



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
GRADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL
TERRITORIO



TRABAJO FIN DE GRADO

Director/a: Pablo Fernández de Arroyabe Hernáez

Curso 2022/2023

**LA IMPORTANCIA DEL OXÍGENO
ATMOSFÉRICO COMO SERVICIO
ECOSISTÉMICO GLOBAL Y VARIABLE
BIOMETEOROLÓGICA**

**THE IMPORTANCE OF ATMOSPHERIC OXYGEN AS A
GLOBAL ECOSYSTEM SERVICE AND
BIOMETEOROLOGICAL VARIABLE**

SERGIO PEÑA GONZÁLEZ

Septiembre 2023

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN / ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1.SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y OXÍGENO	4
1.2.EL CICLO DEL OXÍGENO Y SU PRODUCCIÓN GLOBAL	8
1.3.OXÍGENO, CONTAMINACIÓN Y SALUD HUMANA.....	16
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	20
2.1.OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2.3.HIPÓTESIS PRINCIPALES	21
3. FUENTES DE DATOS Y METODOLOGÍA	21
3.1.FUENTES DE DATOS	21
3.1.1. FUENTES DE DATOS DOCUMENTALES	21
3.1.2. FUENTES DE DATOS METEOROLÓGICOS	22
3.1.3. FUENTES DE DATOS SANITARIOS	22
3.1.4. FUENTES DE DATOS CARTOGRÁFICOS	23
3.2.METODOLOGÍA.....	23
4. RESULTADOS	27
4.1.LOS VALORES GLOBALES DEL DOA	28
4.2.LA PRODUCCIÓN OXÍGENO EN LOS BIOMAS TERRESTRES.....	29
4.3.CASO DE ESTUDIO: DOA Y SALUD EN SANTANDER (2007-2015)	31
4.3.1. VALORES DOA EN SANTANDER ENTRE 2007 Y 2015	32
4.3.2. INCIDENCIA ESPACIO-TEMPORAL DE LAS ECV EN SANTANDER ENTRE 2007 Y 2015	33
4.3.3. ESTUDIO DE LA RELACIÓN DOA – ECV EN SANTANDER ENTRE 2007 Y 2015	39
5. CONCLUSIONES	44
ÍNDICE DE FIGURAS	46
BIBLIOGRAFÍA	48

RESUMEN

En el presente estudio se lleva a cabo una reflexión sobre la importancia que tiene un elemento, presente en la atmósfera y de necesidad básica para la vida: el oxígeno. Además, se realiza una aproximación sobre el papel que tienen los ecosistemas en su producción y regulación, así como las consecuencias para la salud humana derivadas de una variación en su disponibilidad a escala local. De esta forma, se calculan los valores a nivel mundial de la disponibilidad de oxígeno atmosférico con el objetivo de esclarecer las diferencias entre la producción oceánica y continental, así como de la cuantificación para cada uno de los biomas terrestres en el contexto de producción de oxígeno atendiendo al modelo Pronbiomet como referencia. Del mismo modo, se lleva a cabo un caso de estudio para la ciudad de Santander, donde se asocia la disponibilidad del oxígeno atmosférico en el periodo 2007-2015 con las enfermedades cerebrovasculares a través de la observación de los datos del CMBD del Ministerio de Sanidad en relación a las admisiones hospitalarias por este motivo en el principal hospital de la ciudad. Para ello, se emplean diversas herramientas y metodologías que permiten la consecución de los objetivos redactados y el respaldo de las principales hipótesis, en las que se enmarca el concepto del oxígeno atmosférico como una variable biometeorológica de importancia en la salud humana.

Palabras claves: oxígeno atmosférico, servicios ecosistémicos, enfermedades cerebrovasculares, índice DOA

ABSTRACT

This study is focused on the importance of an element present in the atmosphere and a necessity for life: oxygen. In addition, an approach is made to the role of ecosystems in its production and regulation, as well as the consequences for human health derived from a variation in its availability on a local scale. In this way, global values of atmospheric oxygen availability are calculated with the aim of clarifying the differences between oceanic and continental production, as well as the quantification for each of the terrestrial biomes in the context of oxygen production using the Pronbiomet model as a reference. Similarly, a case study is studied for the city of Santander, where the availability of atmospheric oxygen in the period 2007-2015 and its relationship with cerebrovascular diseases are related through the observation of data from the CMBD of the Ministry of Health in relation to hospital admissions. To this end, various tools and methodologies have been used to achieve the objectives set out and to support the main hypotheses, in which the concept of atmospheric oxygen as a biometeorological variable of importance in human health is framed.

Keywords: atmospheric oxygen, ecosystem services, cerebrovascular diseases, DOA index

1. INTRODUCCIÓN

La naturaleza proporciona al ser humano innumerables bienes y servicios que resultan esenciales para el mantenimiento de la vida y de la biodiversidad en el planeta. Algunos de estos preciados bienes son de extrema relevancia para nuestros intereses como seres vivos. Pese a ello, en reducidas ocasiones se sitúa en el foco del debate y de la investigación en disciplinas científicas del mundo de la geografía, como la geografía de la salud o la biometeorología.

1.1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y OXÍGENO

En primer lugar, cabe destacar el importante papel que tienen los beneficios ofrecidos por los servicios ecosistémicos. Para ello, se deberá exponer su definición y los tipos que existen, así como explicar en cuál de ellos se enmarcaría la producción de oxígeno, proceso de vital importancia para la existencia de los ecosistemas, así como del resto de los servicios ecosistémicos.

Para hablar de servicios ecosistémicos hay que entender los ecosistemas y el Medio Ambiente, como redes conectadas entre sí, las cuales reciben y aportan servicios. De este modo, los Servicios Ecosistémicos son aquellos beneficios que se obtienen de la interacción de los elementos que componen estas redes entre sí.

La aproximación a la definición de servicios ecosistémicos (SE) fue presentada por diversos autores, desde la primera mención de la misma por Westman (1977), como los “servicios de la naturaleza”, hasta la propuesta en la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio en 2003, promovido y respaldado por la ONU, como “los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas”, enfocando la definición en la dependencia de la sociedad con los mismos con el objetivo de aumentar la concienciación y fomentar la conservación de la biodiversidad.

Otras definiciones destacables de este concepto son las propuestas por Fisher et. al. en 2009 como: “los aspectos de los ecosistemas utilizados (activa o pasivamente) para producir bienestar humano”; la presentada por la Agencia de Protección Ambiental (U.S. EPA) en 2004: “aquellas funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano o tienen un potencial para hacerlo en el futuro”; o la esbozada por De Groot et. al. en 2002: “son funciones del ecosistema: capacidad de los procesos y componentes naturales para proporcionar bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas, directa o indirectamente”.

Por lo tanto, observando estas definiciones se hace patente las diferencias entre las mismas, la falta de consenso alrededor de este concepto relativamente novedoso y

perteneciente a una disciplina en proceso de consolidación, y la cual en los últimos años aún era objeto de discusión.

Según Fisher et. al., es necesaria una mínima comprensión de la estructura y de los procesos ecológicos que generan estos servicios. Para ello, es necesario un marco teórico que sirva para reconocer, medir, modelar y mapear todos los servicios ecosistémicos, con una especial atención en los cambios que sufren y como esto afecta al bienestar humano.

Estos servicios pueden clasificarse en cuatro grupos, en función del tipo de beneficio que se obtiene de ellos (propuesta de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2003). Esta clasificación es la más ampliamente aceptada, para la cual participaron científicos de 95 países, a través de un análisis de las consecuencias producidas por cambios en los ecosistemas, con el objetivo de integrar la sostenibilidad ecológica, la conservación y el bienestar humano. Consta de cuatro agrupaciones de servicios:

- Servicios de provisión, los referidos al beneficio directo que disfrutamos de los ecosistemas, como la obtención de recursos, los cuales empleamos para producir bienes, para alimentarnos, para elaborar productos farmacéuticos, como combustible, etc.
- Servicios de regulación, son los procesos encargados de regular los fenómenos naturales. A menudo son imperceptibles, pero cuando se encuentran en riesgo las consecuencias pueden ser graves. En este grupo se encuentran la regulación de los flujos de agua, el mantenimiento del clima y la calidad del aire, el almacenamiento del carbono, la polinización o la conservación del suelo, entre otros.
- Servicios de soporte, en este grupo se encuentran los procesos esenciales para la producción del resto de servicios. Son los hábitats para las especies, el ciclo de nutrientes, la conservación de la diversidad genética o la producción de oxígeno.
- Servicios culturales, son aquellos beneficios no materiales que obtenemos de los ecosistemas y de sus procesos, como la identidad cultural, la inspiración estética, el conocimiento científico, así como las oportunidades para las actividades recreativas y su contribución a la salud mental y física, o el turismo. En definitiva, contribuye a la creación de modos de vida en las sociedades.

Figura 1

Servicios ecosistémicos y sus tipos



Nota. Servicios ecosistémicos divididos en sus cuatro grupos: culturales, aprovisionamiento, soporte y regulación. Fuente: World Wildlife Fund (WWF Colombia) (<https://www.wwf.org.co/?324210/Glosario-ambiental-Servicios-ecosis-que>)

Sin embargo, existen otras clasificaciones debido a la complejidad de los procesos de los ecosistemas y de las características de los mismos servicios ecosistémicos, así como la dificultad de aplicación de esta clasificación en según qué casos, por lo que es apropiada la existencia de métodos de clasificación alternativos. De este modo, una de las primeras clasificaciones es la de Constanza et. al. (1997), en la cual se detallan diecisiete servicios ecosistémicos relacionándolos con cada función del ecosistema. A raíz de este primer listado de servicios comienza la aproximación a una clasificación como tal, es con la propuesta por De Groot et. al. (2002), donde se prima la importancia de las funciones de los ecosistemas, en vez de los propios servicios, su relación para proporcionar bienes y servicios, aplicando por primera vez escalas, en concreto la escala física, en relación a las funciones ecosistémicas, y, por otro lado, la escala de valor para los bienes y servicios otorgada por los humanos. Es entonces cuando surge la necesidad de separar las funciones de los bienes y servicios, por lo que se realiza una clasificación en cuatro grupos de 23 funciones básicas de los ecosistemas, de las cuales se obtendrían los bienes y servicios:

- **Funciones de regulación:** En este grupo se encuadran los procesos biogeoquímicos y biológicos que regulan los ecosistemas y sostienen los sistemas vitales. Estos servicios aportan beneficios directos e indirectos como el mantenimiento del aire limpio o la depuración del agua, entre otros.

- Funciones de producción: Aquí constarían aquellos procesos fotosintéticos y autótrofos que permiten la producción de bienes y servicios para consumo humano, desde alimentos y productos medicinales hasta recursos energéticos.
- Funciones de hábitat: Los propios ecosistemas naturales son las estructuras que sirven de hábitat y refugio de las especies, así como de su desarrollo y reproducción, lo que permite la continuidad del resto de funciones. Por lo tanto, esta función proporciona servicios como el mantenimiento de la diversidad biológica y genética.
- Funciones de información: Los ecosistemas proporcionan, además, funciones que favorecen el mantenimiento de la salud humana, así como el desarrollo de sociedades y culturas, o el desarrollo cognitivo, el ocio o recreación, o la identidad a través de paisajes.

Algunos autores afirman que la clasificación de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MA) no es útil para todos los propósitos, por esto existen clasificaciones alternativas. Por un lado, Wallace (2007), emplea una clasificación alternativa en la cual se tiene en cuenta el resultado de una alteración de los ecosistemas sobre el bienestar humano. Los servicios se presentan, en primer lugar, como elementos del sistema, en función de su estructura y composición, a su vez, estos son clasificados en función del valor humano que reciben. De este modo, se presentan cuatro categorías de valores humanos y su relación con los servicios ecosistémicos, con el objetivo de diferenciar los procesos, o medios, para obtener los servicios ecosistémicos, de los propios servicios ecosistémicos, o propósito, y así evitar conflictos a los tomadores de decisiones. Todo esto en adición al rechazo de las definiciones propuestas por el MA, las cuales considera ambiguas, como los procesos del ecosistema, las funciones y los servicios.

Por último, Turner (2008) realiza una clasificación en la cual los servicios ecosistémicos son desglosados también en servicios intermedios y servicios finales, en función del grado de conexión con el bienestar humano y los propios ecosistemas. Esta clasificación facilita la valoración de los beneficios, y su posible empleo en estudios de valoración económica, evadiendo los posibles problemas surgidos de una doble contabilización, ya que se contabilizan los beneficios finales exclusivamente.

De este modo, es importante conocer las diversas clasificaciones de los servicios ecosistémicos, la diversidad de conceptos, y sus fortalezas y debilidades, con el objetivo de tener una visión más amplia de esta noción, favoreciendo su valoración y uso en función de las características del ecosistema o del propósito de la aplicación, así como el fomento al desarrollo del concepto y técnicas de clasificación de los servicios ecosistémicos. Siempre primando el objetivo principal de asegurar la continuidad de los ecosistemas y el suministro de servicios, teniendo en cuenta el funcionamiento del sistema ecológico, el bienestar humano, y el contexto social y político donde vaya a ser estudiado. (Ruiz Luna & Camacho Valdez, 2011)

1.2. EL CICLO DEL OXÍGENO Y SU PRODUCCIÓN GLOBAL

El elemento principal objeto de estudio en el presente trabajo es el oxígeno atmosférico, su producción en los diferentes biomas y la capacidad de influir sobre la salud humana de las variaciones ocurridas a escala local durante un periodo determinado. Por lo tanto, cabe explicar en primer lugar cuál es el proceso biogeoquímico que da lugar a este componente tan sumamente valioso y esencial para la vida en la Tierra.

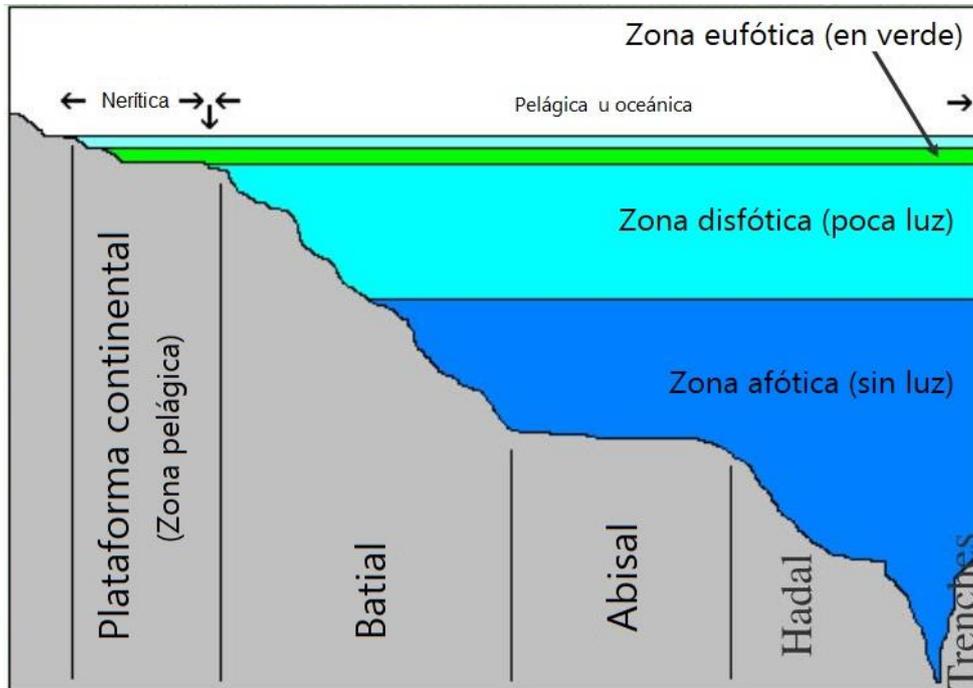
Para la obtención del oxígeno se produce un ciclo biogeoquímico, el ciclo del oxígeno, que se fundamenta en la transformación del mismo mediante diversos vehículos, como la atmósfera, la litosfera, y la biosfera. El ciclo del oxígeno constituye un ciclo biogeoquímico fundamental para el desarrollo de los seres vivos gracias al equilibrio que genera en la composición elemental de la atmósfera terrestre, haciéndola respirable. De este modo, los ciclos biogeoquímicos son aquellos procesos que generan un intercambio de elementos químicos existentes tanto en los seres vivos como en el ambiente, gracias a la descomposición, transporte y formación de estos. En estos ciclos interceden tanto seres vivos, como vegetales, animales o microorganismos, como elementos y materiales naturales inorgánicos, como los vientos, la lluvia, la orografía, etc. Se puede establecer una clasificación de estos en función del estado de los compuestos que se originan: hidrológicos, como el ciclo del agua; gaseosos, como los ciclos del carbono o el oxígeno; y sedimentarios, como el ciclo del fósforo. (Ondarse Álvarez, 2021)

El oxígeno es un elemento químico, O, que se encuentra presente en el aire de manera libre y disuelto en el agua de los océanos. Constituye alrededor de un 21% de los componentes de la atmósfera terrestre, únicamente superado en proporción por el nitrógeno (N). Únicamente puede ser producido por las plantas al realizar el proceso de fotosíntesis.

Cabe destacar la especial importancia que tienen los océanos en la producción del oxígeno, ya que es en este medio donde viven y se desarrollan los fitoplancton, los cuales, gracias a los estudios realizados durante las últimas dos décadas, se ha comprobado que son responsables de la generación de entre el 50 y el 85 por ciento del oxígeno que respiramos, en contraposición a la creencia vigente durante muchos años de que son las plantas terrestres los grandes pulmones de la Tierra, si bien es cierto que su papel en este y otros ciclos naturales esenciales es fundamental. De este modo, el fitoplancton se desplaza por una zona de los océanos, conocida como zona eufótica, cercana a la superficie e iluminada por la luz solar para poder realizar la fotosíntesis gracias a la clorofila. Al mismo tiempo, son la base de la cadena trófica, ya que alimentan al zooplancton que a su vez sirven de alimento para otras especies marinas. (Peinado Lorca, 2019)

Figura 2

Esquema de zonas marinas por profundidad y distancia de la costa



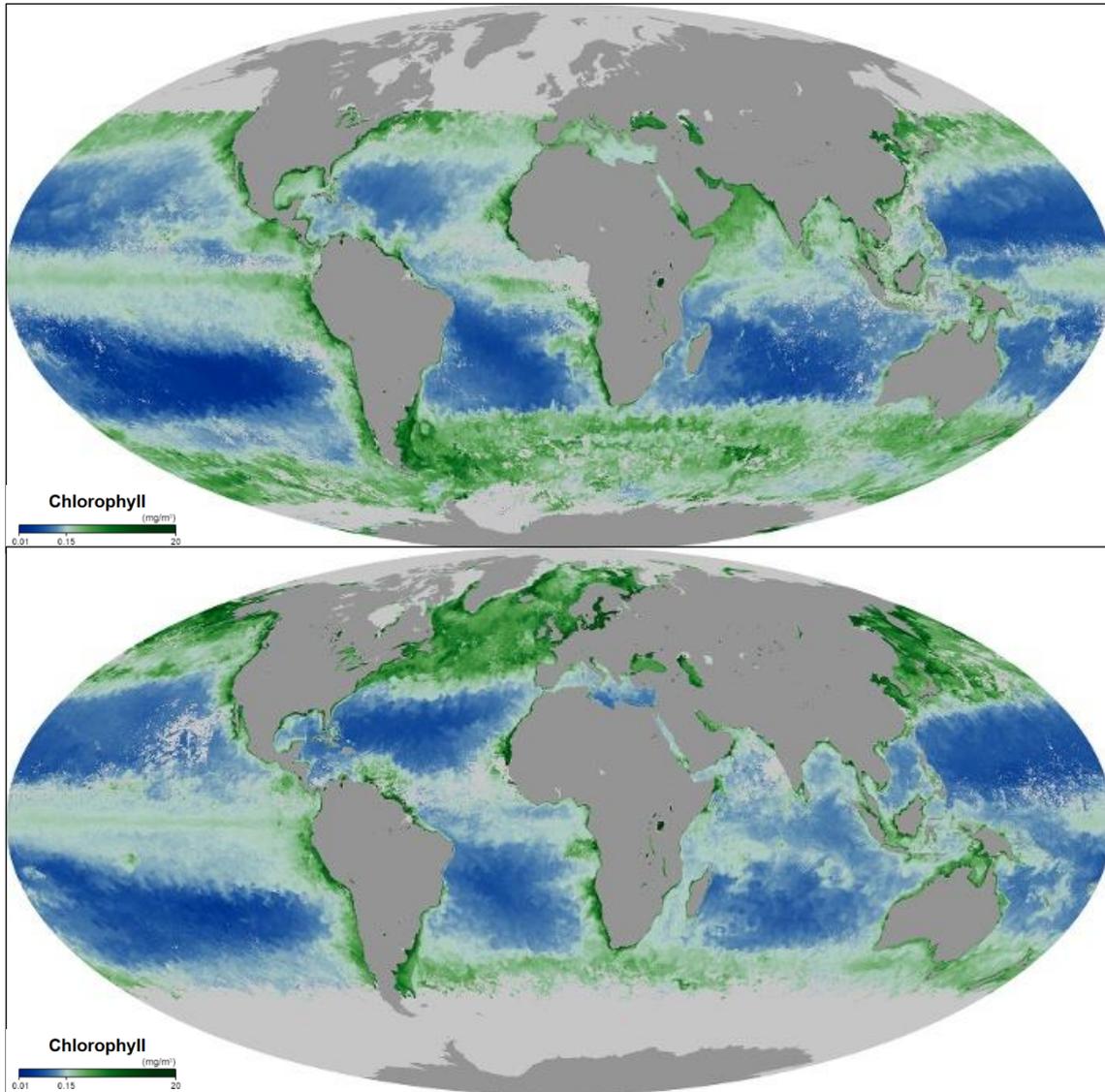
Nota. La imagen representa las zonas marinas en relación a la distancia a la costa y a la profundidad hasta donde penetra la luz solar. Fuente: Blog del Departamento Científico Tecnológico del CEPA Oriente Costa de Llanes – Ribadesella. *Capítulo 2: Ecosistemas acuáticos de agua dulce y marinos.*

Sin embargo, su acción sobre ciclos esenciales para el resto de la vida en la Tierra no finaliza aquí, estos organismos unicelulares, los cuales pueden ser divididos en dos grupos principales: cianobacterias fotosintéticas y algas unicelulares, son responsables de la absorción de alrededor de 10 gigatoneladas de dióxido de carbono, CO₂, las cuales son transferidas desde la atmósfera hasta las profundidades del océano, formando parte del ciclo del carbono. (Peinado Lorca, 2019)

Por lo tanto, como se ha descrito anteriormente, la producción de oxígeno en los océanos y los procesos de intercambio de O₂ entre estos y la atmósfera son la principal fuente de abastecimiento de este componente en el aire. Por ello, es de especial relevancia la producción fotosintética de los organismos marinos, como el fitoplancton, así como sus ciclos de producción, los cuales varían en función de la época y de las diferentes latitudes, al igual que las especies terrestres con capacidad para realizar la fotosíntesis.

Figuras 3 y 4

Producción clorofílica del fitoplancton en diciembre de 2020 (arriba) y mayo del 2021 (abajo)



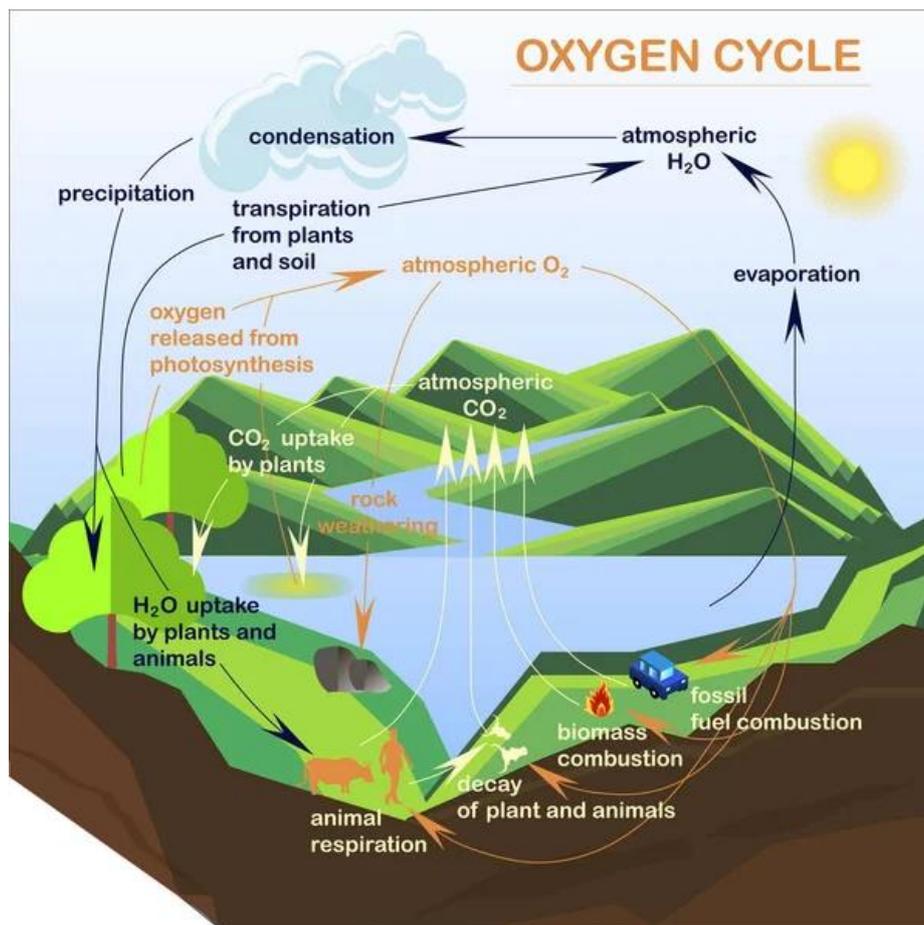
Nota: Ambas imágenes representan los miligramos de clorofila por metro cúbico en el agua en diciembre de 2020 y mayo de 2021, gracias al reflejo y absorción de luz solar. Fuente: Earth Observatory NASA. <https://earthobservatory.nasa.gov/>

Este proceso oscila entre ambos hemisferios a lo largo del año, manteniéndose constante en la zona ecuatorial. Este hecho radica principalmente en cantidad de luz solar recibida, especialmente estacionaria hacia los polos, donde la producción fotosintética en la zona norte alcanza su máximo en los meses de mayo o junio; mientras que, en las zonas circundantes al polo sur, es en diciembre donde se alcanza el pico coincidiendo con la máxima inclinación axial en el hemisferio sur.

Por su parte, las plantas terrestres hacen su función tanto para la producción de oxígeno como para la mitigación del cambio climático, en concreto la biomasa fotosintética se encarga de capturar el dióxido de carbono y la generación de oxígeno. Esta biomasa forma parte de la biomasa viva, y es capaz de aumentar de tamaño gracias a la absorción de radiación solar o electromagnética, mientras expulsa el oxígeno o el vapor de agua. (Red Internacional de Forestería Análoga, 2014)

Figura 5

Ciclo del oxígeno



Nota: La imagen representa el ciclo del oxígeno y sus múltiples fases, así como su relación con otros ciclos biogeoquímicos, como el del agua o el carbono. Fuente: Banco de imágenes DepositPhotos. (<https://mx.depositphotos.com/vector-images/ciclo-oxigeno.html>)

De este modo, el ciclo del oxígeno consistiría en la producción de oxígeno gracias a la fotosíntesis de las plantas, tanto terrestres como marinas, y su aportación a la atmósfera. Entonces los seres vivos, los animales, los seres humanos, y demás seres autótrofos y heterótrofos, emplean este oxígeno para llevar a cabo sus funciones básicas, llevando este oxígeno a sus células y tejidos gracias a la respiración (y expulsando en cambio el residuo

en forma de CO₂, debido a la unión del oxígeno con el carbono). De nuevo, las plantas, tanto terrestres como marinas, emplean este CO₂ durante la fotosíntesis para producir proteínas y obtener su vital glucosa. Finalmente, como resultado del proceso anterior liberan oxígeno a la atmósfera, resultando así un perfecto equilibrio y cerrando el ciclo. (BioEnciclopedia, 2016)

La regionalización o división por áreas que comparten características similares o especies es fundamental para el estudio de determinados parámetros. Por ello, en este análisis atenderemos a estas divisiones de la Tierra a mayor o menor escala. De este modo, se estudiarán los grandes reinos y los biomas. Un bioma puede ser definido como una zona en la que se encuentra un grupo de ecosistemas que comparten características como el clima, la vegetación o la fauna (WWF, 2018). Estos pueden ser divididos en dos categorías: los biomas terrestres y los biomas acuáticos. Los reinos abarcarían las grandes superficies de la Tierra que comparten una serie de condiciones necesarias para el desarrollo de ecosistemas, dando lugar a los biomas y, de manera más precisa, a las ecorregiones.

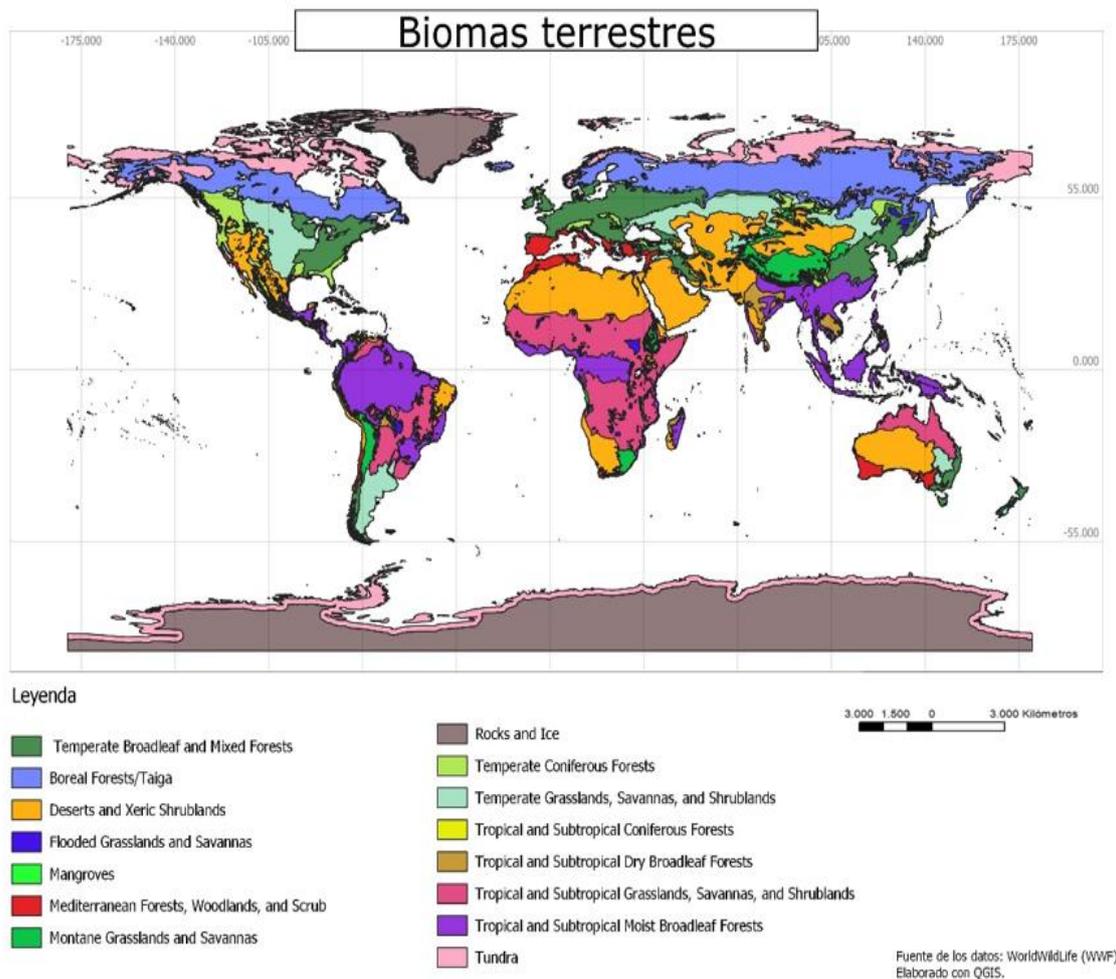
Las ecorregiones se corresponden con unidades de la Tierra con un tamaño lo suficientemente amplio, en las cuales se encuentran series de ecosistemas, y cuya extensión limita con la superficie original de estas comunidades naturales previas al cambio de usos de la tierra en la zona. Además, estas unidades permiten la comparación de zonas del territorio, así como la propia identificación de hábitats y la de especies particulares presentes en ellas. (Olson, y otros, 2001)

De este modo, en el presente estudio atenderemos a los principales biomas terrestres, cuyas condiciones de posición geográfica, temperatura y precipitación son determinantes para el desarrollo de especies vegetales que contribuyen a la producción de oxígeno en la Tierra, con el objetivo de señalar cuales de estas regiones son dominantes en la producción de oxígeno considerando las diferencias espaciales y temporales, mediante datos a lo largo de un año.

Esta distinción por grandes territorios y su aportación de oxígeno a la atmósfera permitirá estudiar los posibles impactos que pueden surgir derivados de una reducción de la biodiversidad en estos biomas, así como del impacto producido por la crisis climática en la actualidad y en las próximas décadas.

Figura 6

Mapa de biomas terrestres



Nota. El mapa representa los grandes biomas terrestres en todo el mundo. Fuente: Elaboración propia a partir del mapa y datos de World Wildlife Fund (WWF): *Terrestrial Ecoregions of the World*.

Aunque hoy en día, gracias a los diferentes estudios oceánicos, podemos saber que la mayor parte del oxígeno que respiramos proviene de los océanos o, mejor dicho, de los microorganismos que viven y se desarrollan en él, es interesante conocer cuáles son las especies forestales que ayudan a la producción del mismo en los biomas terrestres, ya que según estudios recientes sabemos que una gran reforestación a escala mundial podría mitigar en gran medida los efectos adversos del cambio climático. Según el modelo creado por Bastin et. al., un aumento del 25% de la superficie forestal, es decir, unos 900 millones de hectáreas adicionales supondría un potencial para almacenar alrededor de un 25% del carbono atmosférico actual. Esto nos permitirá poner el valor que estos biomas tienen, especialmente a nivel local, así como tienen las consecuencias de determinados

cambios de uso de los suelos y la composición del mismo y, por el contrario, de las ventajas que suponen su implementación en las ciudades como elemento contrapuesto para combatir la contaminación atmosférica, en aquellas urbes que presenten unos niveles de calidad del aire por debajo de lo aceptable. Partiendo de estos valores recomendables que pueden servir para categorizar las ciudades y para calcular qué cantidad de estas especies sería necesario plantar para compensar la afección por los elementos nocivos presentes en el aire.

Hoy en día sabemos que los bosques urbanos proporcionan algunos beneficios en las ciudades en las que se encuentran, como una mejora en la calidad del aire y del agua, la conservación de la energía de las edificaciones, la regulación de la temperatura en las denominadas islas de calor, la reducción de la radiación ultravioleta, entre otros muchos beneficios tanto ambientales como culturales que mejoran la vida de la población. (Nowak y Dwyer, 2007). Sin embargo, según un estudio realizado por Nowak, Hoehn y Crane en 2007 se detallada que, a pesar de que los bosques urbanos tienen una producción relativamente importante de oxígeno, es insignificante en comparación con lo contenido en la atmósfera y el producido por los océanos y el resto de biomas continentales, por lo que la labor fundamental de estos bosques situadas en las urbes es el de mejorar la calidad del aire purificando el aire de trazas de sustancias químicas contaminantes (dióxido de carbono, dióxido de azufre, monóxido de carbono, plomo, etc), así como el resto de beneficios antes enunciados.

Una muestra de actuación que pretende revalorizar las zonas verdes urbanas y los servicios ecosistémicos derivados de ellas es el proyecto Santander Capital Natural (2023), el cual tiene como objetivos principales el reforzamiento de la red de zonas verdes de la ciudad de Santander y la conservación de la biodiversidad a una escala local, así como mejorar la calidad de vida de los habitantes mediante la participación ciudadana tanto en la toma de decisiones como en las diferentes actuaciones, todo ello con vista a incrementar la resiliencia urbana en un contexto de adaptación a diferentes escenarios producidos por el cambio climático. Además, entre las actuaciones específicas se encuentran la creación de una estrategia para la integración de la infraestructura verde municipal y su coherencia con la planificación urbana, la restauración de áreas urbanas y periurbanas degradadas e intensificar el bosque urbano plantando 25000 especies arbóreas autóctonas.

De este modo, para determinar la cantidad potencial de oxígeno que pueden producir los árboles estará determinado por varios factores:

En primer lugar, la tasa de crecimiento de la especie, por lo que, una especie con una tasa de crecimiento mayor producirá más oxígeno, aunque el tamaño de ambos sea el mismo. Esto se debe a que un árbol de crecimiento rápido necesitará más agua y dióxido de carbono para realizar sus funciones vitales y, junto a otros nutrientes encontrados en el suelo, poder crecer. De este modo, la unión de los elementos absorbidos, el CO₂ y el H₂O, permiten la creación de glucosa, por lo cual el exceso de oxígeno en esta reacción química y a la propia respiración es expulsado a la atmósfera. Por otro lado, cuando el árbol muere, se descompone y las bacterias y hongos en el suelo se encargarán de la liberación del almacén de carbono que el árbol tenía. Estos dos puntos anteriores pueden ser explicados gracias a la Ley de Conservación de la Masa, elaborada por Mijaíl Lomonósov en 1748

y más tarde, en 1785 por Antoine Lavoisier, y que consiste en el descubrimiento de que la masa no es ni creada ni destruida durante reacciones químicas, sino que es constante. (Sterner, Small y Hood, 2011)

Otro parámetro importante para saber la cantidad de oxígeno producido es el Índice de Área de la Hoja, el cual muestra la superficie de la hoja por un lado en relación con una unidad de suelo ocupada. Este índice nos permite observar la cantidad de luz que recibe la copa de los árboles, lo cual está directamente relacionado con su crecimiento y, por lo tanto, con la producción de oxígeno.

Otra variable que valorar es el tipo de clima donde se desarrolla la especie, los estudios demuestran que las temperaturas frías ralentizan la fotosíntesis, en contraposición con los climas cálidos que recibirán más luz solar todo el año. Por otro lado, en los climas fríos se desarrollarán especies perennes que liberarán oxígeno en una menor tasa, pero de forma más constante durante todo el año que las especies de hoja caduca.

Como se ha descrito anteriormente, las especies que tienen hoja todo el año producirán una cantidad de oxígeno menor pero más constante, de este modo, la siguiente condición consiste en el tipo de especie que es el árbol, caduca o perenne. Un árbol sin hoja apenas producirá oxígeno, de esta forma, las especies caducas producirán una mayor tasa, así como las hojas caídas se descompondrán y liberarán CO₂, así, las especies caducas apenas producirán oxígeno entre los meses de otoño.

Por último, la producción de oxígeno también dependerá del tipo de suelo en el que se sitúe la especie, ya que de ello dependerá su crecimiento y los nutrientes que puede recibir de él. (Nulli, 2022)

Estudios recientes afirman que los bosques maduros apenas generan un gran beneficio en la producción de exceso de oxígeno. Esto es debido a que el bosque no puede densificarse más y el suelo no contiene ya nutrientes necesarios para el continuo desarrollo. En este estudio se observa que la ausencia de determinados nutrientes en un suelo sobreexplotado permite a los árboles llevar a cabo sus funciones básicas de fotosíntesis, creación de glucosa y liberación de oxígeno, sin embargo, esta glucosa es enviada a las raíces, lo que permite a bacterias y hongos desarrollarse y liberar dióxido de carbono, lo que contrarresta la producción de oxígeno realizada. (Mingkai, 2020)

Atendiendo a los criterios anteriormente descritos podemos encontrar determinadas especies forestales que se presentan como las más favorables para la producción de oxígeno, entre las cuales podemos encontrar: el arce (*Acer*), la píceas (*Picea*), el abeto (*Abies alba*), el abeto Douglas o pino de Oregón (*Pseudotsuga menziesii*) o el haya (*Fagus sylvatica*) (Nulli, 2022). Como se puede observar entre estas especies se encuentran tanto especies con hoja caducifolia como perennes, lo que nos indica que hay que atender a todos y cada uno de los criterios para considerar si una especie es buena productora de oxígeno. Asimismo, la producción de oxígeno de estas especies puede variar en función de la localización y de sus condiciones.

Por otra parte, también es de considerar aquellas especies que son más consumidoras de dióxido de carbono, el cual emplean para realizar sus funciones vitales. De este modo, las especies más consumidoras de CO₂ en entornos forestales y presentes en España son el pino carrasco (*Pinus halepensis*), el olmo (*Ulmus minor*) y el alcornoque (*Quercus suber*),

entre otras como la encina (*Quercus ilex*) y el roble (*Quercus robur* / *Quercus pirenaica*) (Cabrillana, 2020). El primero, siendo maduro, es capaz de absorber hasta 50 toneladas de dióxido de carbono al año. Además, a nivel global, otras especies de gran capacidad para la absorción y almacenamiento del CO₂ son el pino radiata (*Pinus radiata*), originario de América del Norte pero ampliamente cultivado en otras partes del mundo, el eucalipto (*Eucalyptus*), originario de Australia y con una alta tasa de crecimiento lo que lo hace eficaz para la rápida absorción de dióxido de carbono, y el árbol de caucho (*Hevea brasiliensis*), es un árbol tropical de América del Sur y tiene una gran capacidad para almacenar el carbono en su madera y raíces.

1.3. OXÍGENO, CONTAMINACIÓN Y SALUD HUMANA

En relación a la importancia de los niveles de oxígeno como un parámetro más que nos permite obtener una calidad de vida a todos los seres humanos, entre otras especies, y que hay que tener en cuenta a lo hora de establecer sistemas de vigilancia para la salud pública, así como otros componentes presentes en la atmósfera que son perjudiciales para la salud en según qué niveles, como el dióxido de carbono o el metano, se realizará un caso práctico de estudio sobre la posible sincronía entre la variación de los niveles de oxígeno en el aire y el aumento de la morbilidad en una ciudad de España.

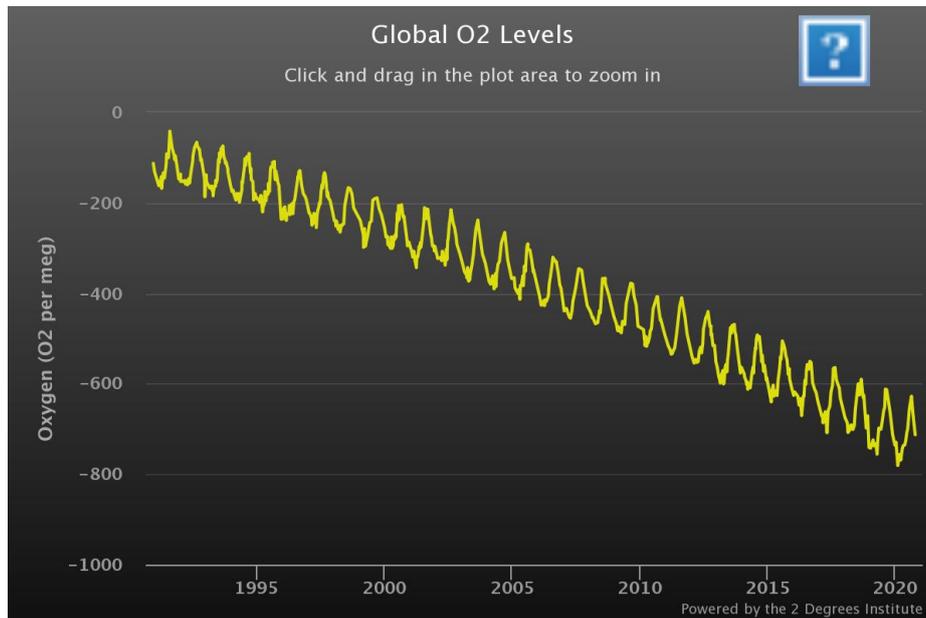
La contaminación atmosférica tiene un efecto importante sobre el nivel de oxígeno, ya que en ocasiones puede producir que este disminuya debido a determinadas reacciones químicas entre el compuesto contaminante y el oxígeno. Por otro lado, la contaminación también afecta a la capacidad de las plantas de realizar la fotosíntesis y, por ende, de producir oxígeno, como se ha descrito anteriormente. Y en otras ocasiones, directamente se mezcla con el oxígeno, dificultando la capacidad de los seres vivos de transportarlo a la sangre.

Como sabemos, el nivel de contaminación atmosférica, calculado a partir de la cantidad de sustancias nocivas para la salud concentradas en el aire, es una clara muestra del grado de calidad del aire presente en determinado lugar y momento, sin embargo, en el presente estudio se centrará en el cálculo del nivel de concentración de oxígeno en la ciudad de Santander, mediante fórmulas que tienen en cuenta tanto la temperatura del aire, la humedad o la presión atmosférica y se relacionará con las admisiones en el hospital por enfermedades cerebrovasculares, con el objetivo de buscar una posible relación entre los episodios de hipoxia e hiperoxia y estas enfermedades.

Estudios recientes como el realizado por el instituto Scripps de Oceanografía de la Universidad de San Diego han observado, mediante mediciones de los niveles de oxígeno en varias estaciones desde Alaska, el océano pacífico, California, hasta la Antártida, una pequeña pero constante reducción de moléculas de O₂ en el aire a nivel global desde 1985 hasta la actualidad debido a la quema de combustibles fósiles (Keeling, 2021).

Figura 7

Evolución del nivel global de O₂



Nota: El gráfico representa la evolución del oxígeno desde 1990 hasta 2021. Fuente: Keeling R.F. et al., 2021. Scripps O₂ Program: Atmospheric Oxygen Research. <https://scripps2.ucsd.edu/index.html>

Pese a que esta reducción no significa una cantidad relevante para la salud de los seres vivos, el cambio en el CO₂ atmosférico por la quema de combustibles fósiles sí resulta más notable, debido a que puede alterar los procesos de intercambio de O₂/CO₂ oceánico en un grado mayor a través del tiempo.

El estudio de esta posible relación entre la variación de la disponibilidad de oxígeno atmosférico y su influencia como agravante de enfermedades, nos permitiría acercarnos a la explicación de determinados picos estadísticos de admisiones en hospitales por este tipo de enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares, respiratorias, u otras afecciones similares, coincidentes con episodios de cambios bruscos y contrastantes en los niveles de oxígeno que generan situaciones de hipoxia, o hiperoxia atmosférica en periodos cortos de tiempo como 24 horas.

Si bien es cierto que a día de hoy apenas hay publicaciones científicas sobre esta materia concreta, es ampliamente demostrado en el ámbito médico el efecto estrés que tiene la exposición a niveles alterados de oxígeno durante un determinado periodo de tiempo sobre el sistema cardiovascular y la afección producida a órganos como el corazón o el cerebro.

El nivel del oxígeno atmosférico se ha considerado generalmente como un factor estable durante el tiempo, debido a esto en muchas ocasiones no se ha tenido en consideración que este pudiera ser afectado por diversas causas y su contenido sea variable. Sin embargo, existen estudios recientes que constatan que este elemento vital para la vida en la Tierra sí que sufre ciertas variaciones espacio-temporales. Por ejemplo, en un estudio realizado por Shi, Cheng, Zhang et al. el cual investiga los factores que contribuyen a la variación de las concentraciones de oxígeno en el oeste de China entre 2017 y 2020, se observaron mediciones de hasta 19,7% de oxígeno concentrado por debajo del valor constante asumido de 20,94% y hasta un 21,64% como valor máximo. Además, se observan relaciones entre la temperatura y la concentración de oxígeno, así como con el tipo de vegetación predominante en la región, para lo cual se estudiaron tanto las cubiertas vegetales como el índice de hoja, y se obtuvieron correlaciones estadísticas significativas y relevantes. Por otro lado, también se encontraron diferencias especiales verticales, ya que se precisó hasta un 0,15% menos cada 1000 metros de altura durante la estación estival. En cuanto a las variaciones temporales también se recabaron resultados reveladores, ya que se encontraron diferencias en un mismo punto entre verano e invierno, siendo la temporada estival donde se computó el dato más alto, del mismo modo que existieron diferencias entre las mediciones diurnas y nocturnas, siendo de esta manera, el dato mínimo calculado un 31 de diciembre a las 7 a.m., y el máximo un 14 de junio a las 15 p.m.

En cuanto al impacto que tienen estas variaciones del nivel de oxígeno atmosférico en la salud de las personas apenas hay literatura específica de este componente. No obstante, existen artículos que recogen algunos indicativos de la relación entre oscilaciones del contenido de oxígeno, de mayor o menor grado, y una repercusión física sobre el bienestar de las personas, especialmente pertenecientes a colectivos vulnerables, como personas de edad avanzada o con enfermedades crónicas.

Según Lecha, en su artículo sobre los pronósticos biometeorológicos para la vigilancia sanitaria y la prevención de efectos meteoro-trópicos, publicado en 2018, describe la investigación llevada a cabo en Cuba durante los años noventa, en la cual intervenían los datos de elementos del tiempo en relación con datos de emergencias, en concreto sobre seis enfermedades crónicas (asma bronquial, hipertensión arterial, enfermedades cardiovasculares, enfermedades cerebrovasculares, migrañas y ciertos tipos de enfermedades respiratorias). Los resultados de este trabajo fueron esclarecedores ya que se estableció una relación entre los contrastes de tiempo interdiario y las crisis sanitarias. Específicamente, los mejores resultados estadísticos se obtuvieron en la variación de la densidad parcial de oxígeno en el aire (índice DOA), en la cual se obtuvieron diferentes respuestas meteoro-patológicas en personas vulnerables dependiendo de si se trataba de episodios de hipoxia o hiperoxia. Sin embargo, según el autor, pese a que los resultados obtenidos no pudieron ser representativos estadísticamente debido a otros factores locales (sociales, ambientales, baja representatividad de los datos médicos, otros procesos físicos entre elementos del tiempo, etc.), este proyecto contribuyó al desarrollo del primer Sistema de Vigilancia y Alerta Sanitaria cubano (SAAS), basado en el índice DOA. Este sistema sirvió de modelo para el desarrollo del posterior modelo Pronbiomet.

De este modelo se obtuvieron relaciones estrechas en Cuba en condiciones de hiperoxia, donde se observó un aumento en las atenciones en las emergencias de los hospitales por

enfermedades respiratorias y cardiovasculares, incluyendo crisis hipertensivas, así como en condiciones de hipoxia se constató un aumento anual de enfermedades cerebrovasculares, derrames cerebrales y migrañas. Gracias a este modelo también pudo confirmarse que esta relación entre el parámetro DOA y los efectos meteoro-trópicos a escala regional, están producidos generalmente por cambios anómalos en la circulación general atmosférica. El uso del cálculo de la densidad parcial de oxígeno en el aire ofrece una perspectiva termodinámica de los procesos atmosféricos, por lo que añade un matiz más complejo y útil para el estudio del impacto de estos en la salud humana que la clásica información cartográfica de la meteorología. (Lecha, 2018)

Este sistema de previsión biometeorológica no es homogéneamente efectivo para todas las enfermedades estudiadas. De este modo, según Lecha (2018): el asma bronquial obtuvo un 94,4% de efectividad, seguido de la hipertensión arterial con 86,8%. A continuación, las enfermedades cerebrovasculares y las migrañas con cerca del 82%, y, por último, las enfermedades cardiovasculares con 75,6%.

De este modo, en investigaciones como la realizada por Fdez-Arroyabe en 2015 en la que se estudian los tipos de tiempo con el objetivo de desarrollar Sistemas de Alerta Temprana personalizados basados en índices biometeorológicos, como el índice DOA (variación de la cantidad de oxígeno) desarrollado por Lecha et al. se relacionan los episodios extremos de hiperoxia con casos de agravamiento de enfermedades respiratorias, como el asma, en el norte de España y Cuba; mientras que episodios extremos de hipoxia se relacionan con un agravamiento de enfermedades cerebrovasculares. Además, se vinculan los cambios extremos entre ambos episodios con un impacto en la morbilidad de las emergencias de los hospitales, así como puede relacionarse con un aumento anómalo de la mortalidad.

Además, este modelo fue contrastado con datos hospitalarios del hospital de Basurto en Bilbao, próximo a nuestro lugar de estudio, donde también pudieron vincularse estos episodios con aumento de admisiones en emergencias para este tipo de dolencias previamente estudiadas en Sagua La Grande en Cuba pese a las diferentes latitudes y contextos climáticos entre ambos lugares. (Fdez-Arroyabe y Lecha, 2008)

Mediante proyectos como la aplicación OxyAlert se pretende crear perfiles biometeorológicos en función de la sensibilidad a cambios meteorológicos mediante un modelo que calcula la variación de los niveles de oxígeno a escala global mediante varias mediciones al día, con el objetivo de enviar al usuario alertas en función de su vulnerabilidad y el cambio de este parámetro producido en 24 horas. Además, se proporciona a cada usuario un cuestionario vinculado a diferentes afecciones que haya podido experimentar, como empeoramiento de la calidad del sueño o dolores de cabeza, coincidiendo una baja calidad del sueño con caídas bruscas de la densidad parcial de oxígeno atmosférico, así como dolores de cabeza significantes con cambios bruscos entre episodios de hipoxia e hiperoxia. (Fdez-Arroyabe, Lecha y Schimt, 2017)

Es importante resaltar, que no es posible asumir que un cambio brusco en los tipos de tiempo o, en este caso, del contenido de oxígeno en el aire pueda ocasionar las enfermedades per se, si bien constituyen un factor de riesgo para personas vulnerables, como personas de edad avanzada o con enfermedades previas cuyos síntomas crónicos puedan ser agravados. (Bucher y Haase, 1993)

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo de este trabajo es el de poner en valor el oxígeno atmosférico como servicio ecosistémico y analizar, mediante una óptica global, las funciones que tienen los biomas en su producción, así como relacionar las variaciones del mismo con las enfermedades cerebrovasculares, como una variable biometeorológica más, en un caso de estudio concreto en la ciudad de Santander.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Se han establecido una serie de objetivos específicos que permitirán indagar en el tema en cuestión y abordar temas necesarios para poder acercarnos a las principales hipótesis que justifican la realización de esta investigación:

1. Realizar una revisión documental y bibliográfica de estudios previos en los cuales la producción de oxígeno atmosférico sea objeto de investigación desde diferentes enfoques, con el fin de desarrollar un marco conceptual y contextualizar este proceso dentro del marco actual de los servicios ecosistémicos.
2. Poner de manifiesto la relevancia relativa de la generación de oxígeno en las zonas continentales respecto al dominio oceánico.
3. Realizar una estimación aproximada, mediante el uso del modelo Pronbiomet, de la disponibilidad media de oxígeno atmosférico de forma global y de manera específica en las zonas continentales, para sus principales biomas.
4. Describir de forma cartográfica y numérica las diferencias existentes en la generación de oxígeno entre los 14 principales biomas del planeta.
5. Desarrollar un caso de estudio concreto que permita describir la evolución temporal del oxígeno atmosférico en la ciudad de Santander para el periodo 2007-2015, con el fin de identificar cambios, tendencias, patrones estacionales y situaciones anómalas.
6. Representar cartográficamente la distribución espacial que presenta en este periodo temporal la tasa de admisiones hospitalarias por ECV en los distintos Distritos Postales (DP) de la ciudad de Santander.
7. Analizar desde un punto de vista biometeorológico, la posible relación existente entre las situaciones de hipoxia e hiperoxia atmosférica y los ingresos hospitalarios debido a enfermedades cerebrovasculares (ECV).

2.3. PRINCIPALES HIPÓTESIS

Las principales hipótesis planteadas que han motivado el comienzo de esta investigación y han servido de guía para la consecución de los objetivos planteados anteriormente han sido las siguientes:

- El papel de las zonas continentales tiene una importancia relativa en la generación del oxígeno atmosférico en el contexto global respecto a las zonas oceánicas.
- Las variaciones en la producción de O₂ en zonas continentales dependen en gran medida del tipo de bioma que lo genere.
- Los cambios bruscos del contenido de O₂ en la atmósfera pueden resultar un riesgo para la salud en personas vulnerables a estos cambios extremos, especialmente en patologías cerebrovasculares.

3. FUENTES DE DATOS Y METODOLOGÍA

3.1. FUENTES DE DATOS

Para el desarrollo de este trabajo ha sido necesaria la revisión de diversas fuentes de datos de carácter científico de diverso origen y finalidad. Además, la enorme complejidad de los temas abordados en el presente estudio hace necesaria la búsqueda de una gran cantidad de datos para su gestión, depuración y análisis, así como de la aproximación a las hipótesis señaladas previamente. De este modo, se han consultado fuentes de diversa tipología y diferente escala para su presentación: fuentes documentales, meteorológicas, sanitarias o cartográficas.

3.1.1. Fuentes de datos documentales

Este origen de información ha estado presente durante todo el estudio, necesario para el recabado de referencias relacionadas con el tema en cuestión. Esto nos ha permitido encuadrar el trabajo dentro del marco de los servicios ecosistémicos para justificar la importancia del oxígeno en ese contexto. También para plasmar los antecedentes publicados sobre la producción de oxígeno continental y oceánico y los posibles efectos de la variación del mismo en la atmósfera, o sobre el funcionamiento y casos de estudio previos mediante el modelo Pronbiomet. Para ello, se ha realizado una revisión bibliográfica de diversos artículos científicos, páginas web, manuales o actas de conferencias.

3.1.2. Fuentes de datos meteorológicos

El mapa con la información del índice DOA a nivel mundial empleado para el siguiente análisis fue obtenido a partir de los datos almacenados en el servidor del grupo Geobiomet, situado en el Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria. Este recaba información cada 6 horas, resultado de una infraestructura de datos biometeorológicos creado como parte del proyecto OxyAlert para lo cual se emplean técnicas de procesamiento de datos espaciales en lenguaje Python para su posterior presentación en visores de web interactivas.

Este sistema se encarga de obtener, procesar y visualizar los datos de uso libre correspondientes para el cálculo de índices biometeorológicos para su uso en diversos estudios científicos. Los datos meteorológicos empleados se obtienen del servicio de datos del *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, en concreto del *NOAA Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS)(GFS)*, los cuales se encuentran en formato GRIB. Por lo tanto, una vez obtenidos los datos meteorológicos que se van a emplear, es necesaria una limpieza y transformación de estos para el posterior cálculo del índice en cuestión: el índice DOA. Este será calculado a partir de tres variables: la humedad, la temperatura y la presión atmosférica. Estos parámetros se ofrecen en formato raster, donde cada unidad, en este caso cada píxel, con una resolución espacial determinada, representa un valor.

Al tratarse de estructuras de datos en formato GRIB que contienen matrices numéricas es posible aplicar operaciones regulares de álgebra de mapas para calcular el índice DOA mediante las capas raster con información de temperatura, humedad relativa y presión a nivel mundial. Una vez obtenido el resultado se almacena en formato TXT y NetCDF, que son formatos comúnmente usados para parámetros biometeorológicos, con el objetivo de su conservación en los archivos.

Por otro lado, para la obtención de datos meteorológicos a nivel local se obtuvieron los ofrecidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) mediante la estación meteorológica del CMT situada en Santander para el periodo 2007-2015. Este fichero contenía información diaria sobre temperatura, presión y humedad, a partir de los cuales se realizaron los cálculos necesarios para la obtención de los parámetros de interés.

3.1.3. Fuentes de datos sanitarios

Para la obtención de datos de ingresos hospitalarios por enfermedades cerebrovasculares para el periodo 2007-2015 en Santander se tiene acceso al Conjunto Mínimo Básico de Datos de Altas Hospitalarias del Ministerio de Sanidad (CMBD-H) relativo a las admisiones hospitalarias. La extracción de los datos se ha realizado mediante una herramienta ETL-OLAP para los códigos de diagnóstico principal 430 a 438 referente a las mismas en la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-9). Esta herramienta nos ha permitido obtener series de datos diarios, semanales o mensuales de ingresos por ECV para los distintos Distritos Postales (DP) del municipio de Santander con codificación entre 39001 y 39012.

3.1.4. Fuentes de datos cartográficos

En relación a la información obtenida a través de cartografía, se ha tenido acceso al visor de datos del Earth Observatory de la NASA para la extracción de datos de producción clorofílica del fitoplancton en el contexto del aporte de oxígeno de los océanos.

Por otro lado, con el objeto de crear cartografía propia relevante al estudio se tuvo acceso a datos del World Wildlife Fund (WWF) sobre las ecorregiones del mundo y con información sobre el bioma al que pertenece. Esto consistía en un *shapefile* a partir del cual se elaboró la cartografía temática de los 14 biomas terrestres existentes en el mundo.

Por último, mediante el portal de contenidos ArcGis Hub de ESRI se obtuvo el archivo *shapefile* de los Distritos Postales en España mediante el cual se elaboró la cartografía temática necesaria en la que se muestran los Distritos Postales para la ciudad de Santander (códigos 39001 a 39012).

3.2. METODOLOGÍA

El modelo Pronbiomet es la base de esta investigación, el cual nos permitirá indagar en todas las hipótesis previamente planteadas para la realización de este estudio. Este modelo responde a unos valores que pueden deducirse de la siguiente fórmula para la obtención del índice DOA (Lecha, 2018) basada en estudios previos de Ovcharova (1981):

$$\rho O_2 = \frac{P - e}{R \times T} \times 0.2315 \times 10^6$$

Cuyo resultado se expresa en gramos por metro cúbico (g/m³), donde:

P: es la presión atmosférica sobre el nivel del mar, en hectopascales.

e: es la presión del vapor, en hectopascales.

R: es la constante universal de gas en aire seco.

T: es la temperatura absoluta en Kelvin, igual a 273 K más la temperatura del aire en grados Celsius.

Este modelo continúa el trabajo realizado con el índice DOA y su relación con sus efectos meteoro-tropicos. Sin tener en cuenta si los cambios a corto plazo producidos en el contenido de oxígeno en el aire son responsables o no de impactos sobre la salud de las personas, se puede constatar que el índice DOA es de útil aplicación e importante para el estudio de esta posible causalidad, debido a que es calculado a partir de tres factores principales en relación con la fisiología humana: la temperatura, la humedad contenida

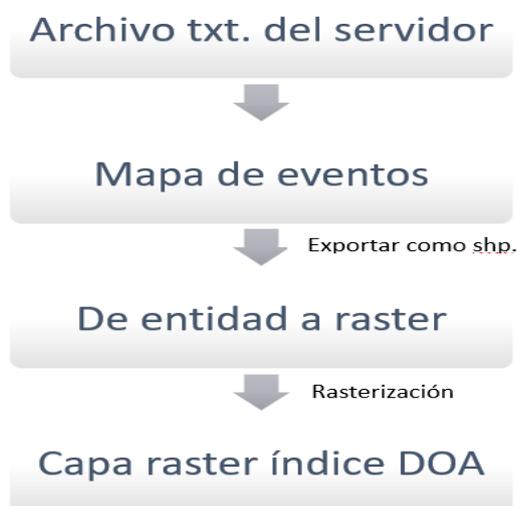
en el aire y la presión. De esta manera, la humedad y la temperatura del entorno afectan de forma directa a la termorregulación corporal, y la presión atmosférica incide sobre el sistema cardiovascular. Estas respuestas meteoropatológicas, las cuales resultan sobre los individuos vulnerables, suceden cuando la autorregulación del individuo frente a los cambios bruscos en su entorno sobrepasa la capacidad de adaptación frente a estos, sea cual sea su tipología. (Jendritzky, 1993)

Este modelo ofrece información de los cambios en la disponibilidad de oxígeno en el aire en diferentes regiones del mundo, y estableciendo una graduación en intervalos en función de la variación y el riesgo que tiene sobre personas vulnerables. Además, este modelo aplica una corrección en función de la latitud en el intervalo neutral 0,1 g/m³ por cada grado por encima o debajo de los 20° de latitud norte o sur, y el resto de los intervalos se ajustan en proporción para determinar si se trata de episodios de hipoxia o hiperoxia en función de su latitud.

En la figura 8 se presenta un esquema de la secuencia de trabajo empleada para el cálculo de los valores del índice DOA a partir de la fuente de datos del servidor GEOBIOMET.

Figura 8

Proceso de elaboración de las capas raster con el índice DOA



Nota: Este esquema muestra los pasos a seguir para la obtención de las cuatro grids del índice DOA necesarias para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la fuente de los datos, se han seleccionado cuatro grids globales para el año de estudio (2020) en cuestión; una grid cada tres meses, con el objetivo de obtener valores medios anuales que consideren los cambios de estaciones y las diferencias entre

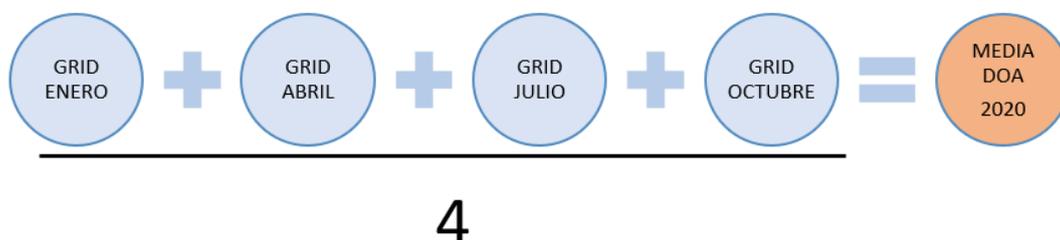
los hemisferios norte y sur. Además, los datos empleados estarán calculados con información obtenida siempre a la misma hora, las 12 del mediodía. Estos archivos se encuentran en formato TXT, por lo cual, al introducirlo en el Sistema de Información Geográfica, en este caso ArcGis, creará un mapa de eventos el cual se exporta en formato shp. con la finalidad de poder emplear la herramienta de rasterización para obtener, finalmente, la capa raster con un tamaño de píxel de salida de 0,5 grados. Esto nos permitirá poder llevar a cabo las operaciones algebraicas con matrices necesarias para obtener nuestra grid final mediante la calculadora raster.

Mediante esta herramienta, se ha estimado el valor medio de la densidad parcial de oxígeno atmosférico para todo el mundo a partir de las cuatro grids correspondientes al día 1 del mes de enero, abril, julio y octubre del año 2020.

Seguidamente, mediante la capa vectorial generada con los catorce biomas analizados y la herramienta *Dissolve* se procede a extraer máscaras o recortes (*Extract by mask*) para cada bioma, de donde se obtiene la útil información estadística descriptiva (máximos, mínimos, medias o desviaciones típicas...) del parámetro estudiado para cada uno de los tipos de biomas.

Figura 9

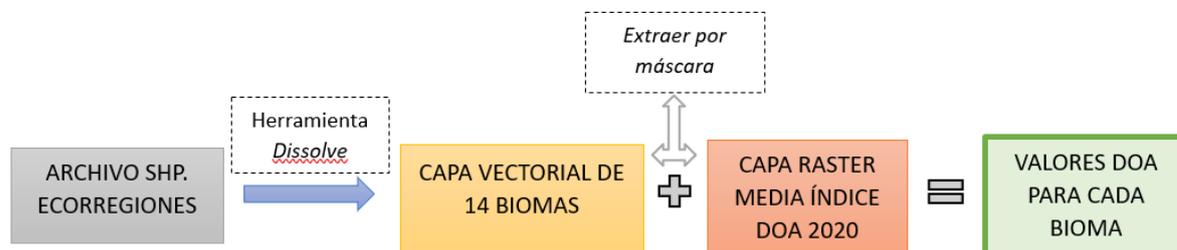
Operación necesaria para la obtención de la media mundial del índice DOA en calculadora raster



Nota: Este esquema muestra la operación realizada mediante las grids de cuatro meses para obtener la capa raster con la media global del índice DOA para el año 2020. Fuente: Elaboración propia.

Figura 10

Proceso de elaboración de la información del índice DOA para cada bioma terrestre



Nota: Este esquema muestra tanto la obtención de la capa vectorial de biomas, como el proceso necesario para obtener la información del índice DOA para cada uno de ellos en el año 2020. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida esta información con los pasos descritos previamente, los resultados de cada tipo de bioma se presentan en forma de tabla. Que muestra los siguientes valores del índice DOA: valores mínimos, máximos, rango, media, desviación típica y el coeficiente de variación calculado a partir de los dos parámetros anteriores.

Por otro lado, el cálculo del índice DOA para la ciudad de Santander se realizó a partir de datos diarios de temperatura, humedad y presión atmosférica registrados por la estación del CMT Santander de la AEMET en esta ciudad, mediante las fórmulas previamente descrita.

El conjunto de los datos de admisiones hospitalarias por ECV fue facilitado por el Ministerio de Sanidad a través de su base de datos de admisiones (CMBD-H). La incidencia de las ECV en la ciudad se calcula mediante una tasa de ingresos hospitalarios por cada 1000 habitantes, tanto para la población total como para la población por Distritos Postales, que resulta de la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{\text{N}^{\circ} \text{ ingresos hospitalarios totales}}{\text{Población total anual}} \right) \times 1000$$

Para el análisis de la relación comprendida entre el índice DOA en Santander y los ingresos por enfermedades cerebrovasculares se prestó especial atención a la variación interdiaria del contenido de oxígeno. Esta representa los días consecutivos a los que el organismo está sometido a un mayor estrés entre ambos episodios de subida y bajada del contenido de oxígeno atmosférico, y se consideró más oportuno para la búsqueda de una

posible relación causal entre ambos parámetros. Gracias a este valor, se identificaron los 25 días con cambios interdiarios más bruscos de ascenso y los 25 de descenso del contenido de oxígeno en la ciudad para su comparación temporal con los datos de ingresos hospitalarios por ECV en esos mismos días y en los dos días siguientes, entendiendo que suele haber un retardo medio en los efectos del impacto del cambio meteorológico.

De esta manera, para analizar la relación teórica entre el parámetro DOA y los ingresos hospitalarios se identifican las 50 fechas con mayor variación interdiaria, los 25 días de cambios extremos de hipoxia, y los 25 días de cambios extremos de hiperoxia, y se revisan las admisiones hospitalarias para esas fechas específicas y los dos días posteriores al cambio. A continuación, se determinan aquellos valores de ingresos hospitalarios anómalos que superan el percentil 70 para esos días. Esto nos permite realizar dos tablas comparativas para observar el número de casos de ingresos producidos por esta enfermedad el mismo día y los dos siguientes a los episodios de hipoxia e hiperoxia en el territorio escrutado. La razón por la que se han tomado el mismo día y los dos próximos a partir de la alteración del nivel DOA es debido al posible periodo de latencia existente entre el supuesto estrés producido por esta variación y la manifestación de síntomas e ingreso hospitalario. Es de relevancia tener en cuenta que los datos trabajados hacen alusión a ingresos hospitalarios, lo que supone la manifestación última del posible efecto sobre población vulnerable de estos cambios, y que su expresión en número de asistencias en las emergencias hospitalarias debería ser mayor y, de algún modo, más representativo de la potencial repercusión sobre la población en su conjunto.

Además, con el objetivo de respaldar y fortalecer los resultados obtenidos se elaboran dos tablas de control a partir de datos aleatorios, que consiste en tomar 10 días al azar de cada tipo de episodio (hipoxia e hiperoxia) y comparar sus resultados de ingresos con los obtenidos en las tablas de las jornadas de mayor importancia respecto a la variación del índice DOA.

Finalmente, se realiza un análisis descriptivo de los casos y la tasa de incidencia de las admisiones hospitalarias por ECV atendiendo a su evolución temporal y también a la distribución espacial de la misma por zonas postales en el municipio de Santander.

4. RESULTADOS

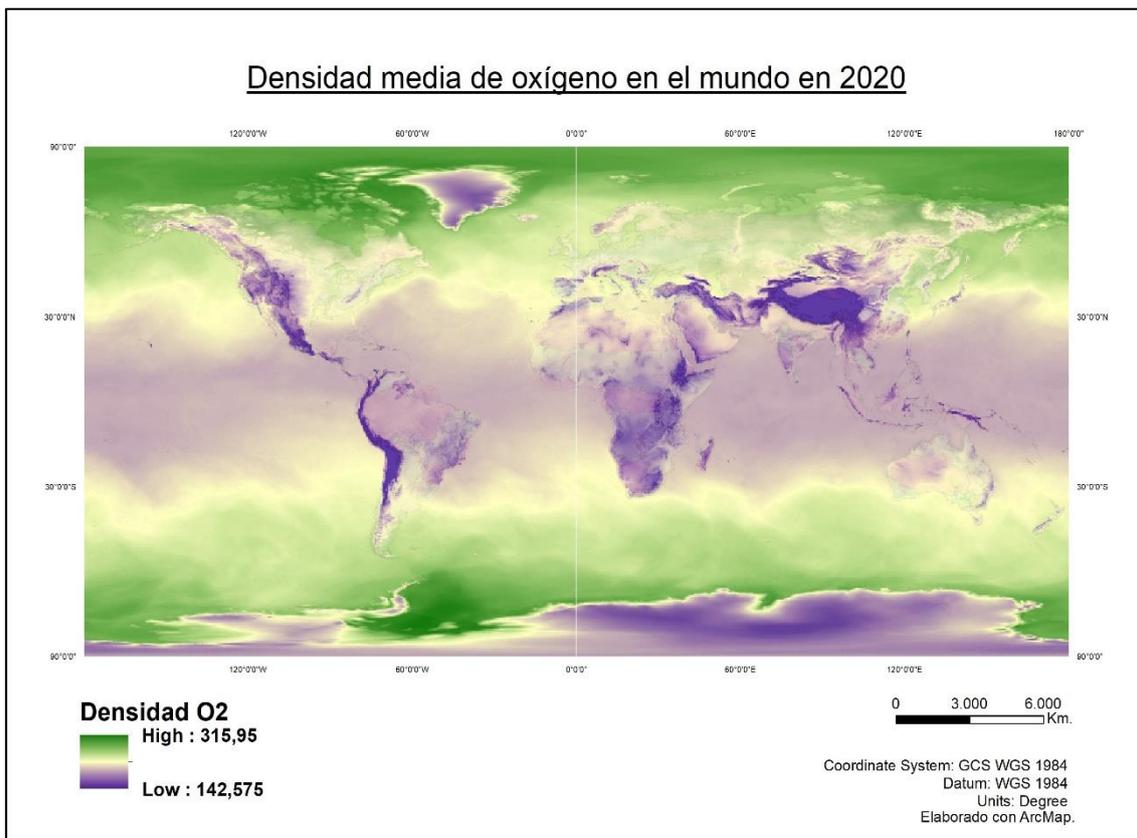
En este apartado se lleva a cabo la presentación de los resultados en base a un criterio multiescalar. De este modo, se hace referencia al cálculo realizado del índice DOA bruto en un ámbito global, en primer lugar; a nivel continental, en el caso del estudio estadístico de la contribución a la producción de oxígeno por parte de los biomas terrestres, en segundo lugar; y, por último, a escala local con el caso de estudio de la posible relación entre ingresos por ECV y la variación del índice DOA en la ciudad de Santander en el periodo 2007-2015. Para ello, la información aportada se respaldará de manera gráfica mediante cartografía, tablas y gráficos.

4.1. LOS VALORES GLOBALES DEL DOA

De este modo, se hace una revisión de los valores mostrados de la disponibilidad de oxígeno a nivel mundial. Esta información tiene en cuenta los valores mundiales, por lo tanto, se tienen en cuenta tanto los datos que cubren los continentes como por los océanos. En la figura 11 aparece reflejada la media mundial en el año 2020, en la cual se puede observar una clara distribución espacial con un aumento del mismo hacia los polos, con sus valores más elevados en zonas oceánicas. Por otro lado, la orografía tiene un papel importante, ya que tienen su efecto sobre los parámetros que entran en juego en el cálculo de este índice. De este modo, los grandes relieves mundiales o las zonas terrestres heladas aparecen con los valores más bajos registrados.

Figura 11

Mapa mundial del valor medio anual de la densidad parcial del oxígeno atmosférico en el mundo en el año 2020



Nota: Este mapa representa la media anual de la densidad parcial de oxígeno atmosférico para el año 2020, calculado a partir del índice DOA y cuatro grids de entrada. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por el Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria.

Es de destacar las fluctuaciones que se observan cerca de los trópicos, las cuales varían a lo largo del año, dependiendo de la estación, como si de ondas se tratara, en función de la dinámica general atmosférica, la cual desplaza los vientos con valores más altos o más bajos obedeciendo a la época del año.

4.2. LA PRODUCCIÓN DE OXÍGENO EN LOS BIOMAS TERRESTRES

El estudio de los valores del índice DOA arrojados por los biomas terrestres en el año 2020 aparece representado en la tabla 1, en la cual se recogen las principales estadísticas para cada uno de los 14 biomas terrestres. Es importante señalar aquí que los estadísticos derivados para cada unidad responden a los valores de los nodos que se encuentran dentro de las distintas unidades espaciales que forman cada bioma.

Tabla 1

Estadísticas del índice DOA para los catorce biomas terrestres

ID Bioma	Tipo Bioma	Mínimo	Máximo	Diferencia Max-Min	Media	Desv. Típica	Coef. Variación (%)
1	Tropical and Subtropical Moist Broadleaf Forests	152,67	258,30	105,63	233,05	12,26	5,26
2	Tropical and Subtropical Dry Broadleaf Forests	163,70	253,63	89,93	235,51	10,19	4,33
3	Tropical and Subtropical Coniferous Forests	187,25	249,07	61,82	218,59	14,55	6,65
4	Temperate Broadleaf and Mixed Forests	183,90	280,38	96,48	256,79	13,77	5,36
5	Temperate Coniferous Forests	147,63	275,85	128,23	235,82	24,11	10,22
6	Boreal Forests/Taiga	225,63	298,35	72,73	270,53	10,92	4,04
7	Tropical and Subtropical Grasslands, Savannas, and Shrublands	183,23	261,33	78,10	234,96	11,57	4,93
8	Temperate Grasslands, Savannas, and Shrublands	178,42	277,20	98,78	254,41	13,74	5,40
9	Flooded Grasslands and Savannas	207,10	278,85	71,75	247,27	18,04	7,30
10	Montane Grasslands and Savannas	142,58	269,65	127,08	185,03	28,48	15,39
11	Tundra	145,05	314,48	169,43	247,39	27,68	11,19
12	Mediterranean Forests, Woodlands, and Scrub	183,70	268,23	84,52	248,64	11,60	4,67
13	Deserts and Xeric Shrublands	159,67	279,85	120,18	244,19	15,00	6,14
14	Mangroves	229,88	249,95	20,07	241,46	2,73	1,13
TOTAL MUNDIAL		142,58	315,95	173,38	258,72	23,07	8,92

Nota: Esta tabla muestra los valores mínimos, máximos, la diferencia entre ambos, la media, la desviación típica y el coeficiente de variación de acuerdo al índice DOA para cada uno de los biomas terrestres. Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se procede a estudiar cada uno de los biomas con el objetivo de encontrar algún dato llamativo y su explicación en el contexto de la densidad de oxígeno y su posible relación con la producción del mismo:

1. En primer lugar, los Bosques Húmedos Tropicales y Subtropicales (Tropical and Subtropical Moist Broadleaf Forests) presentan una gran diferencia entre máximos y mínimos, situándose el máximo ligeramente por debajo de la media mundial, ya que este bioma se encuentra principalmente en latitudes cercanas al ecuador, donde la temperatura y la humedad son más constantes.
2. Los Bosques Secos Tropicales y Subtropicales (Tropical and Subtropical Dry Broadleaf Forests) tienen unos valores similares al anterior bioma por el mismo motivo, aunque son menos extensos, su distribución se produce en latitudes similares por lo que están afectados por características parejas, si bien su rango de amplitud es menor.
3. En los Bosques de Coníferas Tropicales y Subtropicales (Tropical and Subtropical Coniferous Forests) encontramos el valor máximo más bajo, así como su media se sitúa ampliamente por debajo de la media mundial, si bien su desviación típica es mayor que en los biomas previos.
4. Los Bosques Templados de Frondosas y Mixtos (Temperate Broadleaf and Mixed Forests) tienen una alta representatividad en las zonas húmedas en latitudes templadas, debido a esto presenta unos valores tanto mínimos como máximos elevados.
5. Los Bosques Templados de Coníferas (Temperate Coniferous Forests) presenta un rango de amplitud elevado, con unos valores mínimos bajos, situándose su media considerablemente por debajo de la mundial y una desviación típica elevada al localizarse de manera distribuida en zonas templadas y subalpinas con un clima marcado por su altitud.
6. Los Bosques Boreales o Taiga (Boreal Forests/Taiga) muestran dos de los valores máximos y mínimos más elevados, por lo que se sitúa siendo el bioma con una media superior a la media mundial y un coeficiente de variación bajo, al desarrollarse en latitudes altas.
7. Las Praderas, Sabanas y Matorrales Tropicales y Subtropicales (Tropical and Subtropical Grasslands, Savannas and Shrublands) están ampliamente representados geográficamente en el mundo, pero especialmente en latitudes cercanas al ecuador, por lo que tanto su media como su máximo se sitúan por debajo de la mayoría.
8. En las Praderas, Sabanas y Matorrales Templados (Temperate Grasslands, Savannas and Shrublands) al encontrarse en latitudes más altas que el anterior bioma, presenta una amplitud de valores máximos y mínimos superior y una media muy cercana a la media mundial, debido a la influencia del contraste de los climas semiárido y húmedo que los afecta.
9. Las Praderas y Sabanas Inundadas (Flooded Grasslands and Savannas) se distribuyen en latitudes con climas tropicales o subtropicales con un clima húmedo y presentan un valor mínimo alto, así como su desviación típica.
10. Las Praderas y Sabanas de Montaña (Montane Grasslands and Savannas) se encuentran en zonas alpinas, afectadas por un clima frío de montaña, donde se

obtiene el valor mínimo más bajo, así como la media más baja con diferencia, y una desviación típica llamativamente alta.

11. La Tundra (Tundra) está presente en latitudes muy altas, en parte en el interior de los círculos polares, especialmente el ártico, y se caracteriza por bajas presiones y temperaturas, y una humedad relativa variable, presentando unos valores mínimos muy bajos y un máximo récord dentro de estos biomas. Además, así como en el anterior bioma, la desviación típica es muy elevada.
12. En los Bosques, Arboledas y Matorrales Mediterráneos (Mediterranean Forests, Woodlands, and Scrub) situados en latitudes medias y clima mediterráneo, se extraen unos valores cercanos a la media y una amplitud de valores relativamente bajo.
13. Los Desiertos y Matorrales Xerófilos (Deserts and Xeric Shrublands) ocupan grandes superficies de clima semiárido, especialmente en zonas próximas a ambos trópicos, de las cuales se obtienen unos valores con un rango entre máximos y mínimos y una desviación típica considerablemente altos.
14. Por último, los Manglares (Mangroves) se encuentran en zonas tropicales o subtropicales con climas cálidos y húmedos, y registran el valor mínimo más alto, mientras que el valor máximo apenas supera el valor máximo más bajo registrado, siendo, ampliamente, el bioma con menor amplitud en sus valores, además de presentar una desviación típica y coeficiente de variación ínfimos en comparación con el resto de los biomas.

En resumen, atendiendo a los datos globales del índice DOA tomado para el año 2020, se puede observar que ninguno de los biomas terrestres alcanza el máximo registrado, así como apenas uno de ellos supera el valor medio total global, debido a que para esta medición global se tienen en cuenta todos los datos ofrecidos por el servidor previamente descrito, incluyendo los datos tomados en océanos y masas de agua, los cuales no se tienen en cuenta para el cálculo en estos resultados en biomas terrestres y deberán ser estudiados posteriormente para más información relacionada con los biomas marinos y su relación con el índice DOA.

4.3. CASO ESTUDIO: OXÍGENO Y SALUD EN SANTANDER (2007-2015)

Para la presentación de resultados se ha decidido realizar un análisis de una serie de datos referentes al periodo de estudio comprendido entre los años 2007 y 2015, con el fin de alcanzar uno de los grandes objetivos propuestos al comienzo del presente trabajo. Para ello, se observaron los datos del nivel DOA diario en la ciudad de Santander, del que se ha podido derivar el factor más relevante para el objeto en cuestión, la diferencia del nivel DOA de un día con el inmediatamente anterior. Además, se obtuvieron datos de ingresos en el Hospital de Valdecilla de Santander por enfermedades cerebrovasculares, comprendidas entre los códigos [430 a 438] de la Clasificación Internacional de Enfermedades, CIE -9, con datos diarios para su comparación con el parámetro anterior, y por Distritos Postales (DP) para su análisis geográfico en la ciudad de Santander.

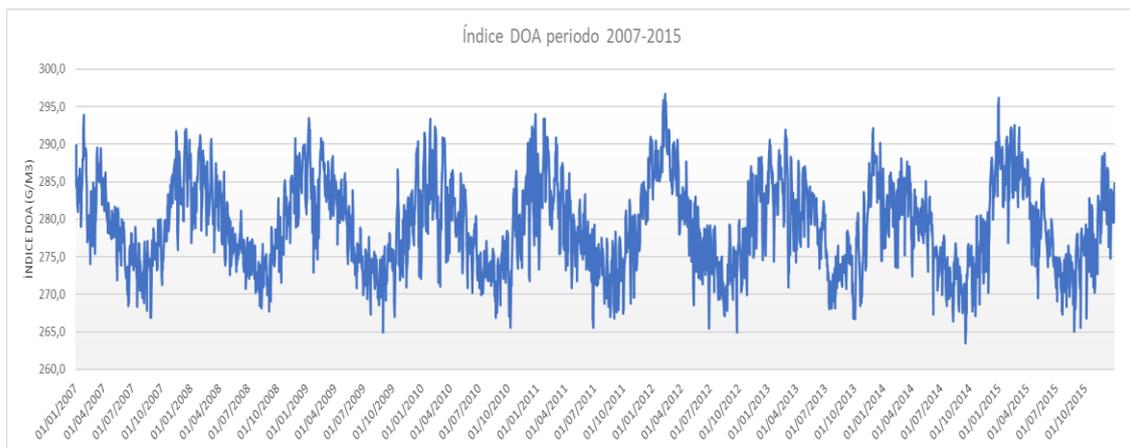
En términos generales, dentro de los estudios biometeorológicos, se entiende que aquellos valores de admisiones hospitalarias que superan la media más una desviación típica de una serie puede responder, en parte, a impactos meteorotrópicos o factores ambientales. Otra forma de identificar anomalías es el uso de percentiles de corte aplicados a las series de estudio. Igualmente, hay un tipo de impacto que se atribuye directamente al contraste o cambio brusco del estado de la atmósfera (Tápanes et al.) que es lo que nos interesa en este caso de estudio de Santander.

4.3.1. Valores DOA en Santander 2007-2015

En la Figura 12, se observa la serie diaria de valores de oxígeno para el periodo 2007-15 en la ciudad de Santander. Los valores extremos de la serie se corresponden con los 296,67 g/m³ y los 263,47 g/m³. La serie presenta una marcada estacionalidad donde los picos se sitúan a finales de invierno y comienzos de la primavera, y los valores más bajos a finales del verano y comienzos de la época otoñal. El valor medio de la serie es de 279 gr/m³ y su desviación típica de 5,85 gr/m³. Igualmente, aparecen ciertos valores infrecuentes o anómalos que sobresalen puntualmente de la curva general de la serie y que, por lo tanto, precisan especial atención dentro del enfoque de este trabajo por su posible relación con los ingresos hospitalarios por la determinada enfermedad.

Figura 12

Índice DOA 2007-2015

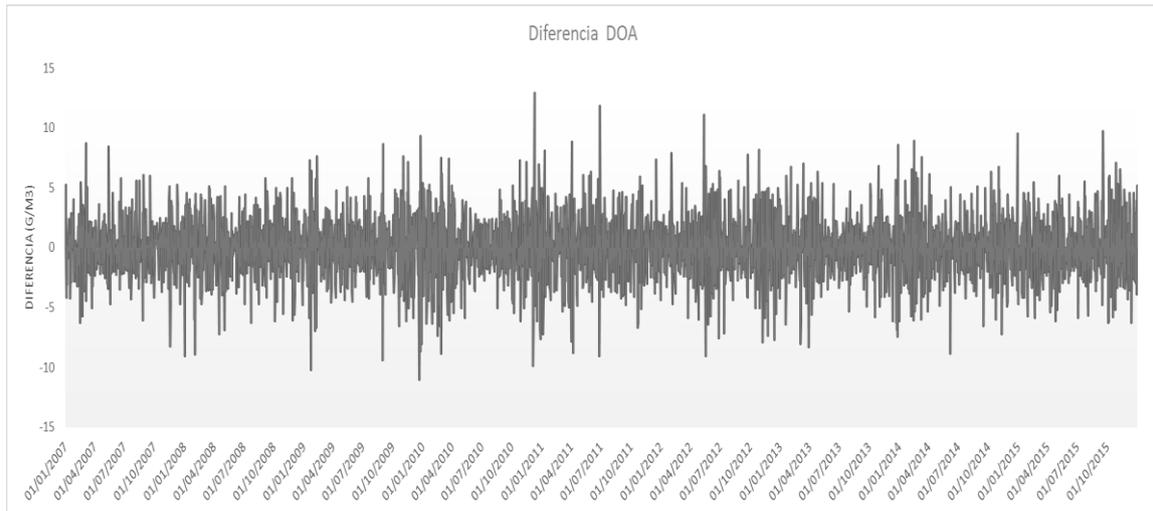


Nota: Este gráfico lineal representa la evolución temporal de la densidad parcial del oxígeno atmosférico en el periodo 2007-2015 en la ciudad de Santander. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AEMET.

Por su parte, en la Figura 13, se describe la evolución de la variación interdiaria del índice DOA, bajo la hipótesis general de que cuanto mayor es esta diferencia, mayor es el impacto meteorológico sobre el organismo y mayor riesgo existe de que se desencadene un aumento de la morbilidad y mortalidad, incluso extremo en aquellos contextos en los que se encadenen episodios de cambios más bruscos del mismo.

Figura 13

Diferencia índice DOA 2007-2015



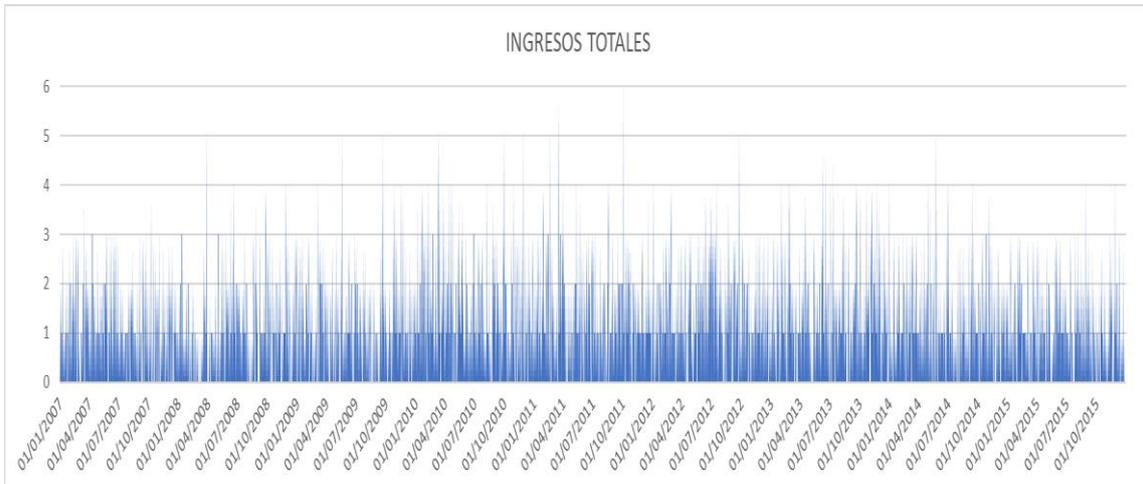
Nota: Este gráfico lineal representa la evolución temporal de la variación del índice DOA respecto al día anterior en el periodo 2007-2015 en Santander. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Incidencia espacio-temporal de las ECV en Santander entre 2007 y 2015

Para el estudio de las admisiones hospitalarias por las enfermedades cerebrovasculares se han empleado los datos de ingresos diarios para el periodo de estudio 2007-2015 para el cual se observan un total de 3587 casos totales y un promedio de 399 casos cada año, con un máximo de 6 ingresos en un solo día.

Figura 14

Ingresos hospitalarios totales por ECV 2007-2015

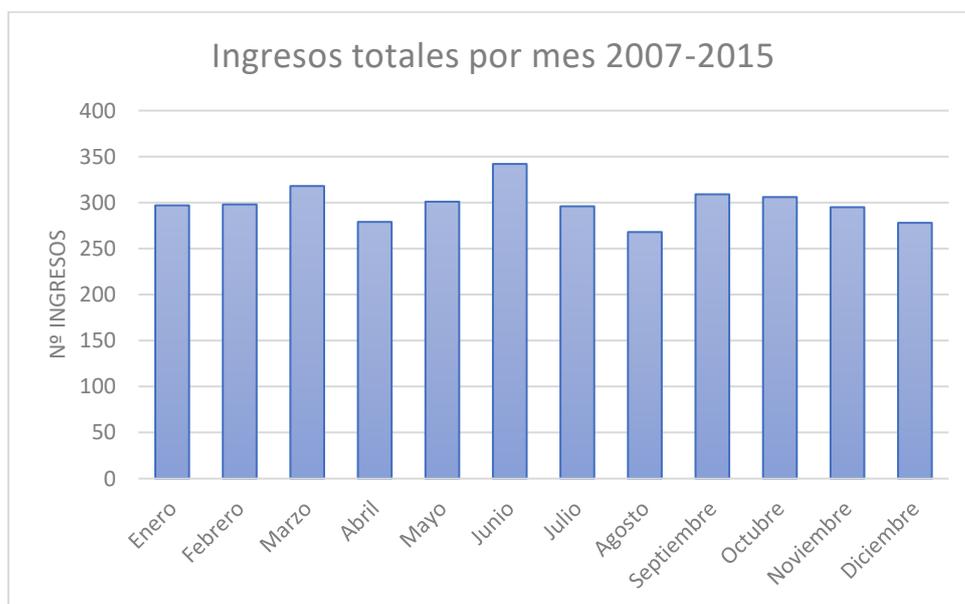


Nota: Este gráfico representa la evolución temporal de los ingresos hospitalarios totales por enfermedades cerebrovasculares (ECV) en el periodo 2007-2015 en Santander. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

Cuando se representan los casos de admisiones por causas ECV por meses (Figura 15) es posible observar cuales son los meses del año donde se acumulan el mayor y menor número de casos y, por lo tanto, si presentan una marcada estacionalidad o, por el contrario, si su distribución es homogénea durante todo el año.

Figura 15

Ingresos totales por ECV por mes del año 2007-2015



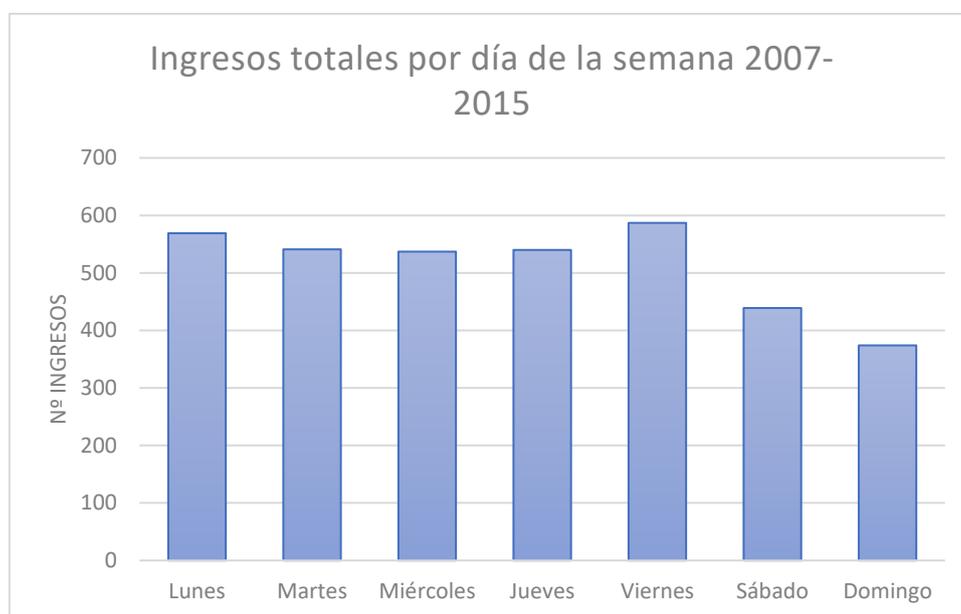
Nota: Este gráfico representa los ingresos totales por ECV por mes del año en el periodo 2007-2015. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

El gráfico parece indicar más bien esto último, al no haber variaciones mensuales excesivamente grandes salvo un pequeño aumento relativo de casos en junio y marzo, y una leve reducción en los meses de agosto, diciembre y abril. Puede ser destacable cierto patrón temporal que surge al final de cada cuatrimestre con una ligera tendencia descendente, pero en términos generales hay una distribución mensual de casos bastante homogénea a lo largo del periodo estudiado.

Sin embargo, el análisis temporal de los ingresos por ECV en Santander en el periodo en cuestión por días de la semana (Figura 16) indica un claro patrón en el que los viernes y los lunes son los días con un mayor número de ingresos hospitalarios, mientras que los sábados y domingos se registran el menor número de casos.

Figura 16

Ingresos totales por ECV por día de la semana 2007-2015



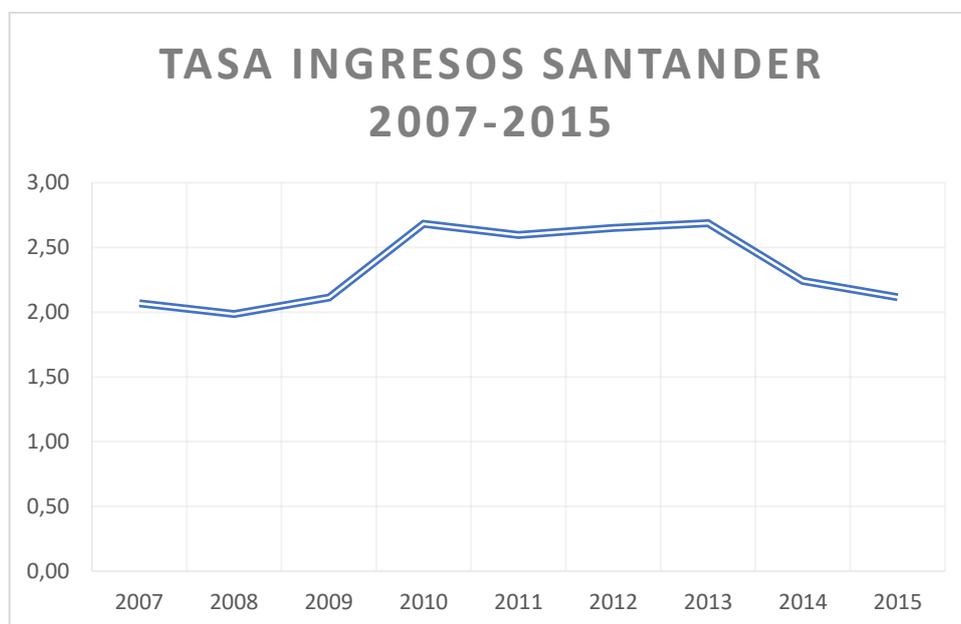
Nota: Este gráfico representa los ingresos totales por ECV por día de la semana en el periodo 2007-2015. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

Cabe destacar la elevada diferencia entre el máximo, situado los viernes, con 587 ingresos, y el mínimo, situado los domingos, con 213 ingresos menos. Esta desigual distribución semanal de los casos de admisiones hospitalarias no puede ser explicada sin considerar múltiples determinantes sociales y culturales, incluso aspectos sanitarios, que ponen de manifiesto la complejidad multifactorial del problema que se estudia en este trabajo.

A partir de los datos anuales, se ha calculado la tasa de ingresos hospitalarios por ECV por cada 1000 habitantes cuya evolución temporal aparece recogida en la Figura 17.

Figura 17

Tasa de ingresos hospitalarios 2007-2015



Nota: Este gráfico lineal representa la tasa de ingresos hospitalarios por ECV por cada 1000 habitantes en el periodo 2007-2015 en Santander. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

En esta gráfica se observa como los valores de tasa máxima se corresponden con el periodo situados entre 2010 y 2013 siendo realmente destacable el incremento que se da en la tasa a partir del año 2008. Es cierto que cada año que transcurre la población se encuentra más envejecida lo que es un factor claro de aumento del riesgo si bien la tasa vuelve a bajar a partir del año 2013. Sería quizá mencionable en este punto el hecho de que la gran crisis financiera internacional se iniciara en el año 2008 y ello pudiera tener derivadas en la salud de diferentes personas afectadas directamente por esta crisis y sus efectos, pero esta es otra hipótesis de trabajo que no se plantea en este estudio.

En la siguiente tabla (Tabla 2) se presenta la tasa de admisiones hospitalarias debidas a enfermedades cerebrovasculares para cada una de las doce zonas postales de la ciudad de Santander indicándose igualmente el total de ingresos por zona y los ingresos medios anuales por zona. Resulta significativa la diferencia de tasa existente entre la zona que se corresponde con el código postal 39007 con la tasa más elevada y la 39004 con la incidencia más baja.

Tabla 2

Población media total, ingresos totales, ingresos medios y tasa de ingresos por Distrito Postal

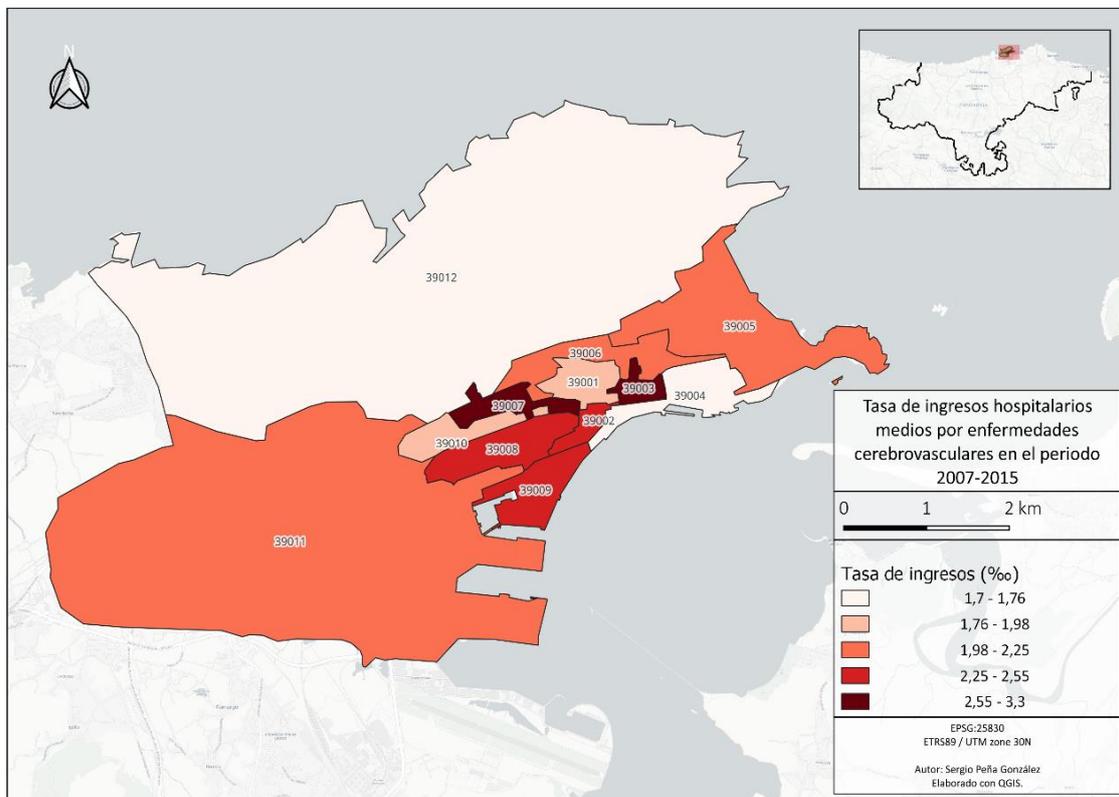
ID	POBLACION MEDIA TOTAL	INGRESOS 2007-2015	INGRESOS MEDIOS 2007-2015	TASA INGRESOS ‰
39001	13663	243	27,00	1,98
39002	3141	72	8,00	2,55
39003	6803	202	22,44	3,30
39004	10422	159	17,67	1,70
39005	12340	231	25,67	2,08
39006	17504	355	39,44	2,25
39007	9592	277	30,78	3,21
39008	13874	312	34,67	2,50
39009	15629	344	38,22	2,45
39010	14183	253	28,11	1,98
39011	35726	672	74,67	2,09
39012	29402	467	51,89	1,76
TOTAL/ MEDIA	182279	3587	33,21	2,32

Nota: Esta tabla recoge los datos de población media total, de ingresos totales, de ingresos medios y la tasa de ingresos por ECV por Distrito Postal en Santander. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

A partir del cálculo de estos datos de incidencia, se ha realizado un mapa de coropletas (Figura 18) en el que se muestra la distribución espacial de los valores de tasa para el periodo de estudio. En él se observa como los valores más altos se concentran en el centro de la ciudad (Códigos 39007 y 39003), así como una predominancia de valores más altos en la mitad Sur, cerca de la Bahía de Santander. Por el contrario, las tasas más bajas se encuentran asociadas a grandes zonas del norte (39012) y al sur del municipio en la zona 39004.

Figura 18

Mapa de tasa de ingresos hospitalarios por ECV 2007-2015



Nota: Este mapa de coropletas representa la tasa de ingresos hospitalarios por ECV por cada 1000 habitantes en el periodo 2007-2015 en Santander. Fuente: Elaboración propia mediante QGIS.

Del mismo que en el análisis temporal, es difícil establecer relaciones entre los resultados plasmados y la hipótesis de este estudio, ya que cabría estudiar diversos factores que entran en juego sobre la población general y, en concreto, sobre la población vulnerable, que pueden agravar ciertas dolencias previas que conlleven un ingreso hospitalario por motivo de una patología de esta índole. De esta manera, variables como la exposición a contaminantes atmosféricos, la densidad de vivienda y población, características de la población como la edad media o el envejecimiento, u otros determinantes socioeconómicos y ambientales, son imprescindibles para explicar la realidad de esta distribución espacial de la incidencia.

4.3.3. Estudio de la relación DOA-ECV en Santander 2007-2015

En este apartado en la Tabla 3 y en la Tabla 4, se presenta los listados de los 50 valores extremos de los cambios interdiarios de la DOA en Santander, tanto los 25 correspondientes a los valores de descenso que representan situaciones de hipoxia atmosférica extrema (Tabla 3 de Hipoxia) como los 25 registros de aumento del contenido de oxígeno que se corresponden con situaciones de hiperoxia atmosférica máxima (Tabla 4 de Hiperoxia) para el periodo de estudio.

En cada una de estas tablas se presentan también los datos de admisiones hospitalarias asociados con códigos propios de ECV para la fecha del cambio extremo y los dos días siguientes. Teniendo en cuenta que el percentil 70 de los ingresos por enfermedades cerebrovasculares es de 1, se ha resaltado en negrita aquellos días en los que este valor es superado, haciendo alusión a una posible mayor sincronía entre ambos parámetros, sin poder afirmarse aún una posible causalidad.

Los resultados comparativos de la tabla referente a los cambios del nivel DOA hacia episodios de hipoxia (Tabla 3) indican que en diecisiete ocasiones de veinticinco se superó el percentil 70 del número de ingresos en al menos un día entre los tres siguientes a la ocurrencia del evento, mientras que solo en cuatro días se superó el percentil en al menos dos de los tres días del periodo de latencia establecido entre el posible estrés sufrido por el organismo de las personas vulnerables y el ingreso hospitalario. El día más destacado es el 27 de junio de 2012 donde se manifiestan los tres días consecutivos de ingresos superiores al percentil 70.

Tabla 3*Episodios de hipoxia e ingresos hospitalarios por ECV*

FECHA	Dif. DOA	Nº INGRESOS
18/11/2007	-8,23	1 -- 2 -- 0
02/01/2008	-9,02	1 -- 0 -- 2
03/02/2008	-8,93	0 -- 0 -- 1
22/01/2009	-10,16	1 -- 0 -- 0
31/08/2009	-9,39	1 -- 1 -- 0
21/12/2009	-11,00	0 -- 1 -- 0
24/12/2009	-8,64	2 -- 0 -- 2
28/12/2009	-8,01	0 -- 2 -- 1
16/02/2010	-7,35	0 -- 1 -- 2
27/02/2010	-8,81	1 -- 0 -- 1
05/12/2010	-9,84	3 -- 1 -- 0
28/12/2010	-7,62	3 -- 2 -- 0
05/01/2011	-7,23	2 -- 0 -- 1
01/04/2011	-7,82	1 -- 3 -- 1
06/04/2011	-8,75	0 -- 0 -- 2
26/06/2011	-9,01	0 -- 2 -- 3
17/05/2012	-9,04	0 -- 2 -- 0
27/06/2012	-7,54	2 -- 3 -- 2
08/11/2012	-7,90	0 -- 1 -- 0
23/11/2012	-7,36	1 -- 1 -- 1
13/12/2012	-7,65	0 -- 2 -- 1
04/03/2013	-8,03	1 -- 2 -- 1
29/03/2013	-8,28	3 -- 1 -- 0
27/12/2013	-7,42	0 -- 0 -- 0
06/06/2014	-8,81	1 -- 0 -- 2

Nota: En esta tabla comparativa se presentan las fechas de los 25 días de mayor importancia de episodios de hipoxia en el índice DOA, la diferencia en gr/m3 del índice DOA respecto al día previo, y los ingresos por ECV de los 3 días posteriores al evento. En **negrita** los casos que superan el percentil 70. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

Los resultados de la Tabla 4, donde se presentan los episodios de hiperoxia en el espacio estudiado y las admisiones hospitalarias por ECV, indican que en veintiún días de los veinticinco observados se superó en al menos una ocasión el percentil 70 de los ingresos hospitalarios, siendo en ocho fechas cuando se superó en, al menos, dos de los tres días del periodo de latencia. Además, se observa un periodo relevante el 2 de noviembre de 2009, donde se superaron en los tres días el percentil en cuestión.

Tabla 4*Episodios de hiperoxia e ingresos hospitalarios por ECV*

FECHA	Dif. DOA	Nº INGRESOS
05/03/2007	8,70	0 -- 0 -- 1
14/05/2007	8,40	1 -- 2 -- 2
20/01/2009	7,23	2 -- 1 -- 1
10/02/2009	7,60	0 -- 1 -- 2
01/09/2009	8,60	1 -- 0 -- 1
02/11/2009	7,60	3 -- 2 -- 2
25/12/2009	9,26	0 -- 2 -- 2
26/02/2010	7,43	3 -- 1 -- 0
21/03/2010	7,42	1 -- 2 -- 1
25/10/2010	7,27	1 -- 2 -- 2
15/11/2010	7,13	1 -- 3 -- 0
09/12/2010	12,90	1 -- 2 -- 1
09/01/2011	8,10	1 -- 2 -- 1
03/04/2011	8,82	1 -- 2 -- 2
28/06/2011	11,81	3 -- 3 -- 0
17/12/2011	7,32	1 -- 1 -- 4
02/02/2012	7,84	1 -- 1 -- 3
11/05/2012	11,06	1 -- 1 -- 1
24/09/2012	7,71	5 -- 2 -- 1
27/10/2012	8,11	0 -- 1 -- 0
28/12/2013	8,56	0 -- 0 -- 4
15/02/2014	8,87	0 -- 1 -- 2
10/03/2014	7,52	0 -- 3 -- 1
29/12/2014	9,53	2 -- 2 -- 1
17/09/2015	9,68	0 -- 3 -- 0

Nota: En esta tabla comparativa se presentan las fechas de los 25 días de mayor importancia de episodios de hiperoxia en el índice DOA, la diferencia en gr/m³ del índice DOA respecto al día previo, y los ingresos por ECV de los 3 días posteriores al evento. En **negrita** los casos que superan el percentil 70. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

Existen varios días consecutivos que encadenan episodios de variación tanto hacia hipoxia como hiperoxia que cabe resaltar. En primer lugar, entre el 31/08/2009 y el 1/09/2009 se producen un episodio de contraste importante, sin embargo, no aparece reflejado un impacto significativo en los ingresos de los tres días posteriores. Entre el 26/06/2011 y el 28/06/2011 sucede una gran variación de la disponibilidad de oxígeno, con un aparente resultado en los ingresos, con varios días consecutivos con un número de ingresos hasta tres veces superior al percentil 70. En la semana del 21/12/2009 al 28/12/2009 se producen varios días de variaciones significativas en el nivel DOA, con un registro, en más de la mitad de los días, de un número ligeramente superior al percentil en cuestión. Por último, tras los días 27/12/2013 y el 28/12/2013 con episodios importantes de hipoxia e hiperoxia, respectivamente, se suceden varios días sin registro de ingresos, hasta el tercer día tras el último evento en el que se registran 4 ingresos en un mismo día, uno de los valores más elevados del total analizado.

De cara a poder validar los resultados de un modo sencillo, sin recurrir a complejos modelos estadísticos, se han elaborado dos tablas de control (una para los datos de hipoxia y otra para los de hiperoxia) (Tablas 5 y 6) donde se han seleccionado aleatoriamente diez días del total de días con valores interdiarios de hiperoxia y otros diez del total de registros con valores interdiarios de hipoxia. Estos registros se emplean como muestra aleatoria sobre los resultados previamente mostrados.

Tabla 5

Muestra aleatoria de episodios de hiperoxia e ingresos

GRUPO CONTROL HIPEROXIA		
FECHA	Dif. DOA	INGRESOS
08/03/2010	3,19	0 - 0 - 1
05/02/2010	1,52	0 - 0 - 3
04/08/2014	0,47	0 - 1 - 1
11/09/2012	1,94	3 - 1 - 0
24/12/2012	0,95	0 - 0 - 1
08/11/2007	0,82	0 - 1 - 2
24/01/2011	0,97	2 - 0 - 2
13/12/2010	3,40	0 - 0 - 2
18/02/2012	0,51	2 - 0 - 1
20/06/2010	2,29	2 - 2 - 0

Nota: Esta tabla comparativa muestra 10 días aleatorios de hiperoxia obtenidos como muestra de control y sus ingresos hospitalarios correspondientes por ECV en los 3 días posteriores. En **negrita** los casos que superan el percentil 70. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

Tabla 6*Muestra aleatoria de episodios de hipoxia e ingresos*

GRUPO CONTROL HIPOXIA		
FECHA	Dif. DOA	INGRESOS
17/10/2015	-5,81	3 - 1 - 1
21/04/2014	-1,04	0 - 1 - 1
09/07/2009	-0,90	0 - 1 - 0
20/11/2015	-2,00	0 - 0 - 0
05/10/2008	-6,10	0 - 2 - 3
25/07/2008	-1,59	1 - 0 - 1
06/01/2012	-0,19	1 - 0 - 0
20/10/2010	-2,64	0 - 1 - 3
12/06/2014	-0,28	1 - 1 - 1
30/09/2007	-4,16	0 - 0 - 1

Nota: Esta tabla comparativa muestra 10 días aleatorios de hipoxia obtenidos como muestra de control y sus ingresos hospitalarios correspondientes por ECV en los 3 días posteriores. En **negrita** los casos que superan el percentil 70. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad.

De este modo, atendiendo a la comparativa entre los casos estudiados previamente de las 25 jornadas más relevantes para casos de hiperoxia e hipoxia y la muestra aleatoria, se puede observar que en el caso de la hiperoxia en un 84% de los días estudiados en los 25 días de mayor variación ascendente del índice DOA se superaba en el menos 1 día de los 3 del periodo de latencia el percentil 70, frente a un 70% de los días del grupo de control del mismo evento. Además, se superó en 2 de los 3 días de latencia en un 32% de los días, en contraposición al 20% de la muestra aleatoria.

Por otro lado, en el caso de los episodios de hipoxia, en un 68% de los 25 días de mayor variación descendente del índice DOA se superó en al menos 1 día el percentil 70, frente a un 30% de los días en la muestra aleatoria, lo cual indicaría una mayor sincronía entre ambos. Las fechas donde se superaron en al menos 2 días el percentil indicado se sitúan en un 16%, en oposición a un 10% de la muestra aleatoria.

Mientras que, como se ha indicado anteriormente, existen resultados de estudios previos (Fdez-Arroyabe y Lecha Estela, 2008) que indican una relación entre la variación abrupta del nivel DOA y un aumento de asistencias en las emergencias hospitalarias, es arriesgado establecer una posible correlación estadística entre los resultados arrojados en esta comparación entre los ingresos por enfermedades cerebrovasculares (ECV) y los cambios en la densidad parcial de oxígeno en la atmósfera.

Esto es debido a los posibles factores sociales, ambientales o sanitarios que pudieran tener capacidad de alterar estos resultados. Además, cabe estudiar si es realmente más importante en relación al estrés sufrido por el organismo, una mayor concatenación de días con alternancia entre ambos episodios de hipoxia e hiperoxia, aunque resulten más leves, que el caso en cuestión en el que se han observado los eventos más grandes producidos en el periodo establecido.

5. CONCLUSIONES

En el presente documento se ha culminado la aproximación a un estudio cuyo eje central es la puesta en valor del estudio del oxígeno como elemento básico, más allá de su obvia importancia para el desarrollo de la vida, como producto fundamental resultante de los servicios ecosistémicos y como de una variable biometeorológica más para el estudio de las relaciones entre los procesos atmosféricos y la biosfera. Para ello, se establecieron, al comienzo de este trabajo, una serie de objetivos específicos que nos acercaran a la idea principal con la que se concibió.

La realización de esta investigación se ha llevado a cabo gracias a la revisión de diversas fuentes de información, de diferente tipología, a través de la cual se ha podido conocer el contexto existente en el ámbito científico del tema en cuestión, así como sus antecedentes. Además, se han empleado herramientas técnicas y metodologías indispensables para la labor, como Sistemas de Información Geográfica necesarios para la elaboración y análisis de la información cartográfica, siempre con el modelo Pronbiomet como base para la metodología del estudio.

De este modo, haciendo referencia al comienzo de esta investigación, es preciso resaltar que se han cumplido todos los objetivos planteados inicialmente gracias a los cuales se han podido obtener algunas conclusiones que pueden agruparse en seis grandes bloques, los cuales se detallarán a continuación:

1. La obtención de datos medios mundiales del índice DOA para el año 2020 ha permitido cuantificar la producción de O₂ a escala global, tanto en medios terrestres como oceánicos, gracias a lo cual se ha podido resaltar la importancia que tienen los océanos en la producción de oxígeno respecto a los biomas terrestres.
2. La cuantificación de los datos arrojados por los biomas terrestres para el índice DOA han indicado las diferencias existentes entre cada tipo, siendo necesario un análisis más exhaustivo de las características de cada bioma o, en su caso, de las ecorregiones terrestres, y de los factores que propician estas diferencias, más allá de las diferencias de latitud y orográficas que se han observado.

3. El estudio de la relación entre las admisiones hospitalarias por enfermedades cerebrovasculares y la variación del nivel DOA en la ciudad de Santander entre los años 2007 y 2015, han resultado de interés para el desarrollo de futuras investigaciones en la materia debido a las deducciones obtenidas.
4. La obtención de valores DOA a escala local y el estudio de sus patrones temporales en Santander para el periodo en cuestión han presentado una clara estacionalidad a lo largo del año, con picos al comienzo de la primavera, y los niveles más bajos a finales de la época estival.
5. La elaboración de una tasa de incidencia de esta enfermedad en Santander y el estudio temporal y espacial de los ingresos parciales y totales derivados, han permitido observar una estacionalidad bastante homogénea y una distribución espacial concentrada en el centro de la ciudad.
6. Por último, si bien es cierto que se han obtenido algunos resultados objetivos que sugieren la existencia de relaciones entre ambos parámetros, no ha sido posible establecer una vinculación estadística clara entre ellos debido a las múltiples limitaciones que presenta el estudio tan complejo como este.

Una de las principales limitaciones existentes en este trabajo viene dada por el hecho de que el valor medio del DOA mundial y las estadísticas generadas para los biomas terrestres para el año 2020 se ha obtenido a partir de tan solo cuatro días concretos, uno para cada estación, por lo que el resultado de los valores para los 365 días del año debería variar. Debido a esto, los resultados mostrados deben tomarse como una aproximación metodológica para el cálculo de un valor medio mundial.

En definitiva, la complejidad de los elementos estudiados dificulta la consecución de resultados concluyentes, ya que entran en juego multitud de variables que no se han tenido en cuenta para la realización de esta exploración: factores físico-ambientales, determinantes demográficos y socioculturales, la representatividad de los datos, etc. No obstante, se han obtenido algunas deducciones objetivas que indican la necesidad de una mayor investigación en el asunto que permita aumentar el conocimiento del efecto que tiene la variación del oxígeno atmosférico sobre los organismos vivos y, en concreto, la salud de las personas.

ÍNDICE DE FIGURAS

Tablas:

Tabla 1. *Estadísticas del índice DOA para los catorce biomas terrestres.* Fuente: Elaboración propia. (pag. 29)

Tabla 2. *Población media total, ingresos totales, ingresos medios y tasa de ingresos por Distrito Postal.* Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 37)

Tabla 3. *Episodios de hipoxia e ingresos hospitalarios por ECV.* Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 40)

Tabla 4. *Episodios de hiperoxia e ingresos hospitalarios por ECV.* Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 41)

Tabla 5. *Muestra aleatoria de episodios de hiperoxia e ingresos.* Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 42)

Tabla 6. *Muestra aleatoria de episodios de hipoxia e ingresos.* Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 43)

Figuras:

Figura 1. *Servicios ecosistémicos y sus tipos.* Fuente: World Wildlife Fund (WWF Colombia) (pag. 6)

Figura 2. *Esquema de zonas marinas por profundidad y distancia de la costa.* Fuente: Blog del Departamento Científico Tecnológico del CEPA Oriente Costa de Llanes – Ribadesella. (pag. 9)

Figura 3. *Producción clorofílica del fitoplancton en diciembre de 2020.* Fuente: Earth Observatory NASA. (pag. 10)

Figura 4. *Producción clorofílica del fitoplancton en mayo de 2021.* Fuente: Earth Observatory NASA. (pag. 10)

Figura 5. *Ciclo del oxígeno.* Fuente: Banco de imágenes DepositPhotos. (pag. 11)

Figura 6. *Mapa de biomas terrestres.* Fuente: Elaboración propia a partir del mapa y datos de World Wildlife Fund (WWF): *Terrestrial Ecoregions of the World.* (pag. 13)

Figura 7. *Evolución del nivel global de O₂.* Fuente: Keeling R.F. et al., 2021. Scripps O₂ Program: Atmospheric Oxygen Research. (pag. 17)

- Figura 8. *Proceso de elaboración de las capas raster con el índice DOA*. Fuente: Elaboración propia. (pag. 24)
- Figura 9. *Operación necesaria para la obtención de la media mundial del índice DOA en calculadora raster*. Fuente: Elaboración propia. (pag. 25)
- Figura 10. *Proceso de elaboración de la información del índice DOA para cada bioma terrestre*. Fuente: Elaboración propia. (pag. 26)
- Figura 11. *Mapa mundial de la densidad media de oxígeno en el mundo en 2020*. Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por el Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria. (pag. 28)
- Figura 12. *Índice DOA 2007-2015*. Fuente: Elaboración propia. (pag. 32)
- Figura 13. *Diferencia índice DOA 2007-2015*. Fuente: Elaboración propia. (pag. 33)
- Figura 14. *Ingresos hospitalarios totales por ECV 2007-2015*. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 34)
- Figura 15. *Ingresos totales por ECV por mes del año 2007-2015*. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 34)
- Figura 16. *Ingresos totales por ECV por día de la semana 2007-2015*. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 35)
- Figura 17. *Tasa de ingresos hospitalarios 2007-2015*. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CMBD del Ministerio de Sanidad. (pag. 36)
- Figura 18. *Mapa de tasa de ingresos hospitalarios por ECV 2007-2015*. Fuente: Elaboración propia mediante QGIS. (pag. 38)

BIBLIOGRAFÍA

- Bastin, J. F., Yelena Finegold, C. G., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potencial. *Science*, 76-79.
- BioEnciclopedia. (2016). *Ciclo del Oxígeno: BioEnciclopedia*. Obtenido de <https://www.bioenciclopedia.com/ciclo-del-oxigeno/>
- Bucher, K., & Haase, C. (1993). Meteorotropy and medical-meteorological forecasts. *Experientia*, 759-768.
- Cabrillana, A. (2020). *Plantas que consumen más CO2*. Obtenido de Agroecología: <https://agroecologia.es/plantas-que-consumen-mas-co-2>
- Fdez-Arroyabe, P. (2015). Climate change, Local Weather and Customized Early Warning Systems based on Biometeorological Indexes. *Journal of Earth Science and Engineering*, 173-181.
- Fdez-Arroyabe, P., & Lecha Estela, L. (2008). Validación en el norte de España de dos sistemas de alerta sanitarios basados en la idea del contraste meteorológico extremo. *Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología*, (págs. 781-792). Tarragona.
- Fdez-Arroyabe, P., Lecha Estela, L., & Schimt, F. (2018). Digital divide, biometeorological data infrastructures and human vulnerability definition. *International Journal of Biometeorology*, 733-740.
- Instituto de Ecología y Biodiversidad de Chile. (s.f.). *Servicios Ecosistémicos: IEB Chile*. Obtenido de <https://ieb-chile.cl/aprende-sobre/servicios-ecosistemicos/>
- Jendritzky, G. (1993). The atmospheric environment - an introduction. *Experientia*, 733-740.
- Keeling, R., Walker, S., Merchant, L., Paplawsky, W., Seibel, J., Clark, S., & Lueker, T. (2022). *Scripps O2 Program: Atmospheric Oxygen Research*. Obtenido de Scripps Institution of Oceanography: <https://scrippsco2.ucsd.edu/index.html>
- Lecha Estela, L. (2018). Biometeorological forecasts for health surveillance and prevention of meteor-tropic effects. *International Journal of Biometeorology*, 741-771.
- Mingkai, J., Medlyn, B. E., Drake, J. E., Duursma, R. A., & Anderson, I. C. (2020). The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment. *Nature*, 227-231.
- Nowak, D., & Dwyer, J. (2007). Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. *Urban and Community Forestry in the Northeast*, 25-46.
- Nowak, D., Hoehn, R., & Crane, D. E. (2007). Oxygen production by urban trees in the United States. *Scientific Journal of the International Society of Arboriculture*, 224.

- Nulli, S. (2023). *Which trees produce the most oxygen? - How & Why*. Obtenido de <https://sustainability-success.com/which-trees-produce-the-most-oxygen/>
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V., Underwood, E. C., . . . Kassem, K. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 933-938.
- Ondarse Álvarez, D. (2021). *Ciclos biogeoquímicos: Concepto*. Obtenido de <https://concepto.de/ciclos-biogeoquimicos/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad: FAO*. Obtenido de <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>
- Peijun, S., Yanqiang, C., Gangfeng, Z., Haiping, T., & Zhi, C. (2021). Factors contributing to spatial-temporal variations of observed oxygen concentration over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nature*.
- Peinado Lorca, M. (2019). ¿Quién produce el oxígeno que respiramos? La respuesta flota en los océanos. *El País*.
- Proyecto Santander Capital Natural. (2023). *Santander Capital Natural*. Obtenido de <https://santandernatural.es/>
- Red Internacional de Forestería Análoga. (2014). *¿Qué es la biomasa fotosintética?: RIFA*. Obtenido de <https://www.analogforestry.org/what-is-photosynthetic-biomass/?lang=es>
- Ruiz Luna, A., & Camacho Valdez, V. (2011). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Biociencias*, 3-13.
- Sterner, R., Small, G., & Hood, J. (2011). *The Conservation of Mass*. Obtenido de The Nature Education: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-conservation-of-mass-17395478/>
- Tápanes Robau, D., Santurtún, A., & Fdez-Arroyabe, P. (2023). The meteorological contrast index in the context of climate change and public health. *ScienceDirect*.
- World Wildlife Fund. (2012). *Terrestrial Ecoregions of the World: WWF*. Obtenido de <https://www.worldwildlife.org/publications/terrestrial-ecoregions-of-the-world>
- World Wildlife Fund. (2018). *Glosario ambiental: ¿A qué nos referimos cuando hablamos de biomas?: WWF*. Obtenido de <https://www.wwf.org.co/?326410/Glosario-ambiental--A-que-nos-referimos-cuando-hablamos-de-biomas>